21

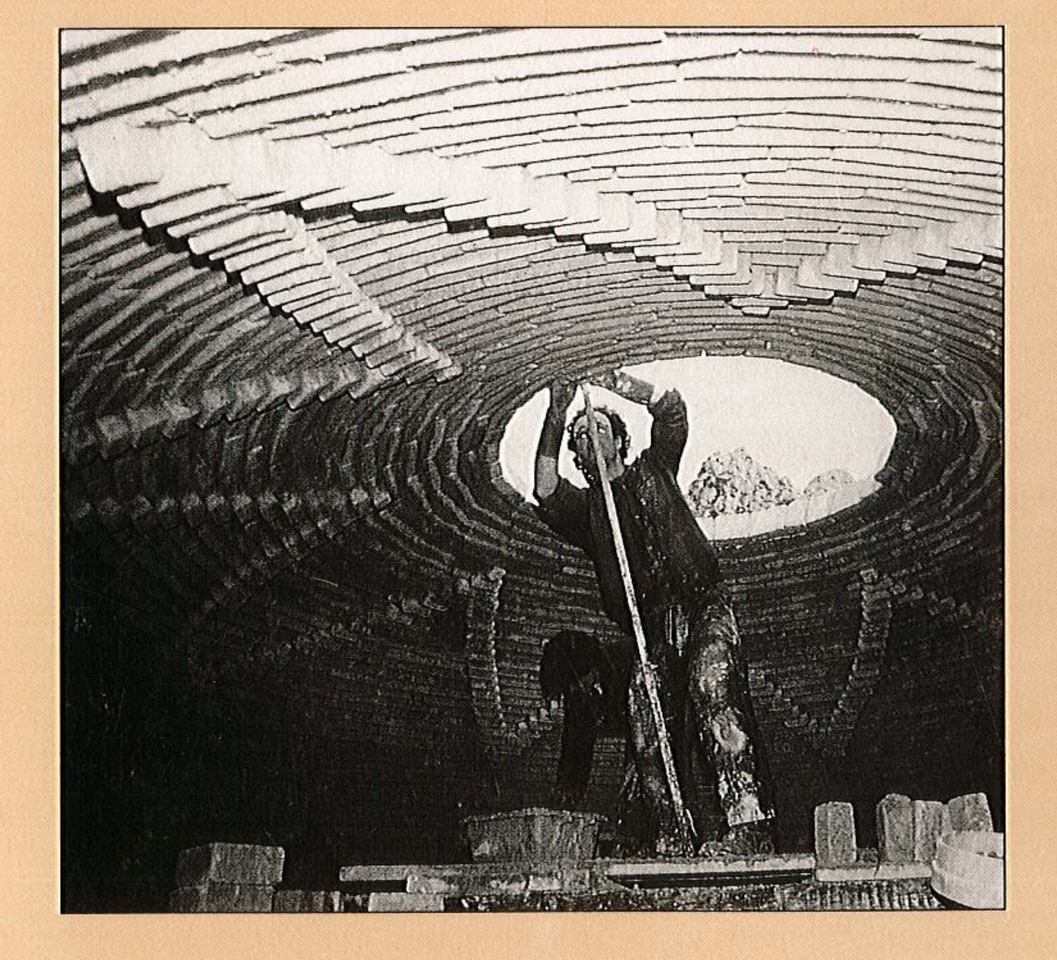


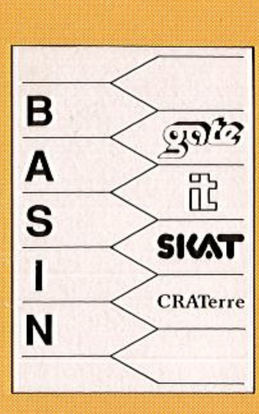
CRATerre-EAG

Eléments de Base sur la

Construction en Arcs, Voûtes et Coupoles

Possibilités et limites de la construction en arcs, voûtes et coupoles pour les décideurs et les pro-fessionnels de la construction







La ville de Théra, île de Santorin dans les Cyclades, Grèce.

Eléments de Base sur la Construction en Arcs, Voûtes et Coupoles

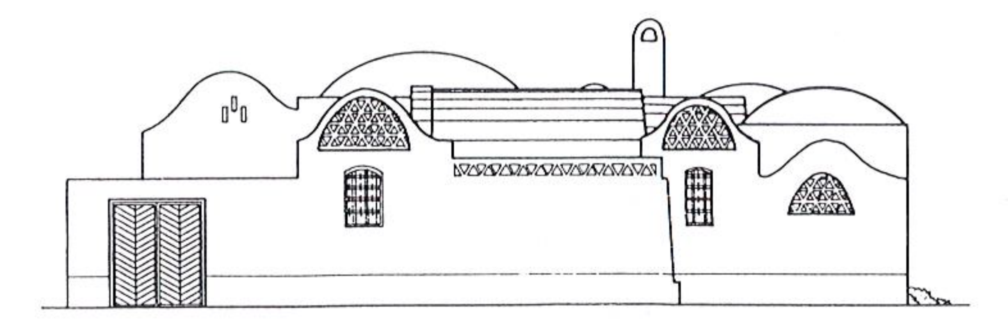
Une publication du SKAT, Centre de Coopération Suisse pour la Technologie et le Management, 1994.

Auteurs: Thierry Joffroy avec la participation de Hubert Guillaud, architectes-chercheurs, **CRATerre-EAG**

Contributions de: Patrice Doat, Alexandre Douline, Josep Esteve, Philippe Garnier, Hugo Houben, Serge Maïni, Pascal Odul et Vincent Rigassi du CRATerre-EAG,
et avec les avis de: John Norton, Development Workshop ; Roland Besenval, CRAO-CNRS ; Myriam Olivier, ENTPE de Lyon ; Gernot Minke, Université de Kassel ; Kiran Mukerji, Planning and Building in the Tropics. Editing by Karl Wehrle et Heini Müller, SKAT

SKAT-Bookshop, Vadianstrasse 42, CH-9000 St.Gallen, Switzerland,
Fax: +41 71 23 75 45

TABLE DES MATIÈRES



Projet de l'architecte Hassan Fathy, villa au Fayoum en Egypte, 1984.

ARCS, VOUTES ET COUPOLES

Une technologie millénaire

L'utilisation des systèmes constructifs en arcs, voûtes et coupoles pour la construction de bâtiments remonte à la plus haute antiquité. Dès le 3e millénaire av. J.-C., leur usage est très répandu dans les pays du Moyen-Orient et en Égypte .

Les arcs, voûtes et coupoles furent aussi largement utilisés par les bâtisseurs romains, sassanides et byzantins avant d'être adoptés dans de nombreuses régions d'Europe.

Des applications très nombreuses se sont aussi développées dans le Maghreb, la région soudano-sahélienne d'Afrique ainsi que les régions du nord de la Chine .

Beaucoup de ces pays sont toujours dotés d'un riche patrimoine bâti en arcs, voûtes et coupoles, tant dans les zones urbaines que dans les zones rurales. Dans nombre de cas, leur construction reste une tradition vivante et adaptée aux besoins modernes de l'habitat populaire.

Diversité

Les nombreux types d'arcs, voûtes et coupoles permettent une grande variété de modèles architecturaux. De fait, cette technologie peut s'adapter aux conditions climatiques les plus diverses, zones arides ou pluvieuses, froides ou chaudes.

Si les arcs, voûtes et coupoles s'utilisent généralement pour couvrir des espaces réduits, ils conviennent parfaitement pour la réalisation d'espaces beaucoup plus grands, de dimensions allant jusqu'à plusieurs dizaines de mètres. Ainsi ils permettent de répondre à tous les programmes de construction, privés et publics : habitat social ou de standing, greniers, entrepôts, commerces, écoles, bâtiments publics et religieux, etc.

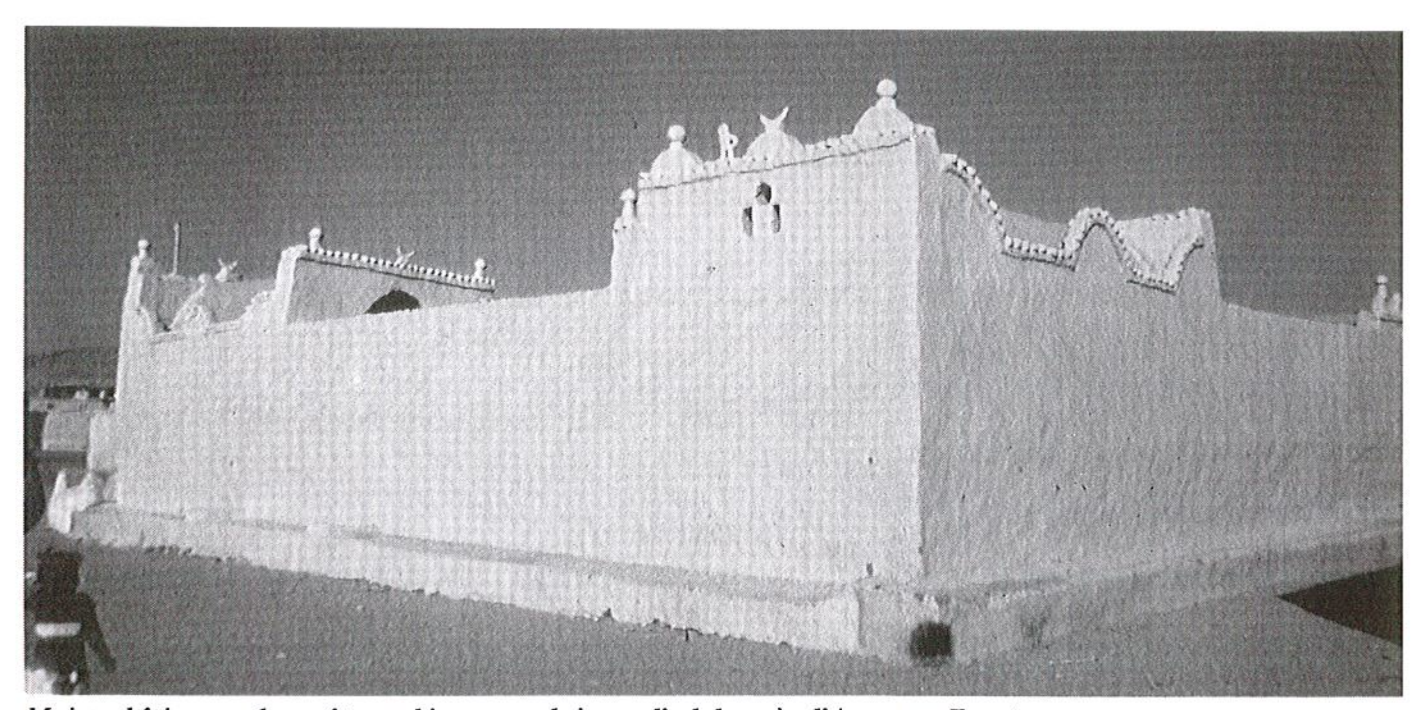
Projets récents

Oubliés par le secteur formel du bâtiment depuis l'apparition des bétons, les arcs, voûtes et coupoles sont redécouverts dans les années quarante par l'architecte égyptien Hassan Fathy qui s'inspire de la tradition populaire nubienne pour la conception et la construction du nouveau village de Gourna.

Le succès international de ce projet ainsi que des autres réalisations de Hassan Fathy éveilla chez les architectes un regain d'intérêt .

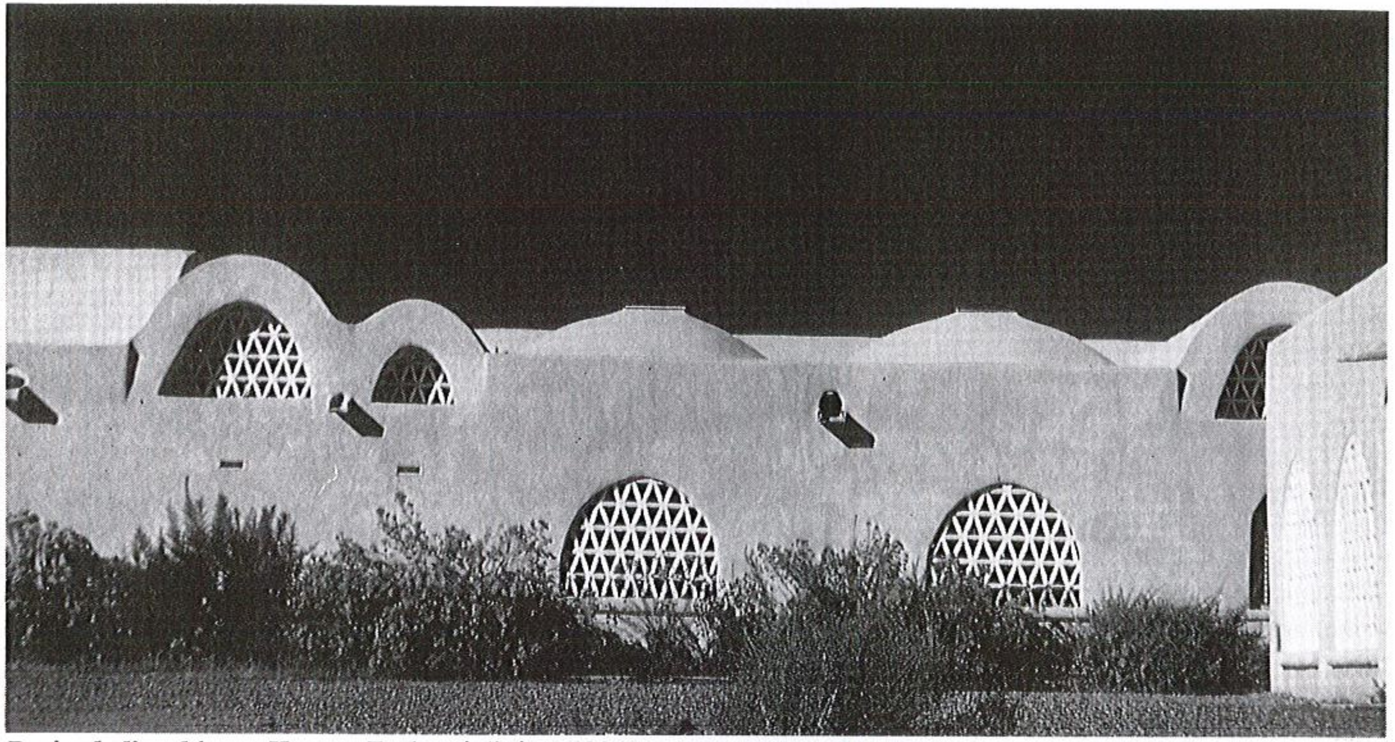
Ayant décelé un potentiel important dans ces modèles architecturaux, des responsables de projets de développement ont relancé l'utilisation des arcs, voûtes et coupoles.

Ces programmes ont permis la réalisation de nombreux bâtiments à vocations variées et s'adaptant aux besoins de différents pays.



Maison bâtie avec des voûtes nubiennes en briques d'adobe près d'Assouan, Egypte.

TRADITION, ACTUALITÉ ET AVENIR



Projet de l'architecte Hassan Fathy réalisé en 1981 au Nouveau-Mexique, USA.

Convenance

Les arcs, voûtes et coupoles représentent souvent une bonne solution pour couvrir des bâtiments de toute sorte et de toutes dimensions. Toutefois leur acceptabilité ainsi que leur adaptation aux besoins réels et aux conditions climatiques locales ne peuvent être garanties.
De fait, des études préalables sont nécessaires pour permettre d'effectuer de bons choix et de sélectionner des solutions techniques appropriées.
Afin de garantir la bonne conception et la bonne exécution des ouvrages, une formation spécifique doit être assurée à tous les niveaux.

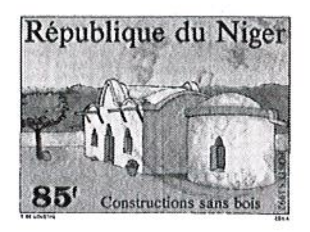
Maîtrise

L'expérience accumulée depuis une vingtaine d'années permet de maîtriser à nouveau la conception et la construction de bâtiments utilisant les structures en arcs, voûtes et coupoles.
Cette technologie se développe actuellement dans plusieurs régions du monde: Afrique sahélienne, Proche et Moyen-Orient, Inde, Amérique latine.
Mené initialement au Niger, le programme "Construction sans bois" propose des solutions techniques simples et adaptées au contexte. De plus, une politique de recherche et de formation est menée, assurant son bon transfert auprès des populations. Ce programme a obtenu le prix "Habitat" en 1992 et s'étend actuellement dans d'autres pays du Sahel.

Recherche-développement

Bien que les arcs, voûtes et coupoles soient assez bien maîtrisés, la recherche-développement est poursuivie dans quatre domaines principaux:

1 - l'identification systématique des modèles et types et de leurs divers modes d'utilisation;
2 - les outils adaptés permettant de se substituer au tour de main des bâtisseurs traditionnels;
3 - la mise au point de méthodes de calcul simplifiées;
4 - les techniques de protection contre les infiltrations d'eau de pluie: étanchéité, écoulements, entretien des surfaces.



ARCS, VOUTES ET COUPOLES

Les carences des toitures traditionnelles

Dans de nombreux pays, le bois de bonne qualité nécessaire à la construction des toitures traditionnelles n'est plus disponible en quantité suffisante. Dès lors, on observe l'emploi de bois de mauvaise qualité, l'importation, ou encore un passage aux techniques conventionnelles "modernes": charpente en bois avec couverture en tôles ondulées, ou encore dalles en béton armé.
Progressivement, ces techniques s'imposent comme la seule alternative aux techniques traditionnelles.

Inconvénients des technologies modernes

Les produits industriels tels que les plaques d'amiante et la tôle ondulée ne sont pas toujours bien adaptés aux conditions locales (chaleur, froid, bruit, aspect, etc.). Ils sont souvent importés ou encore produits dans des unités centralisées et favorisent plus une faible qualification que la création d'emploi.
Les systèmes de construction à base de béton armé sont grands consommateurs de matériaux coûteux (ciment, acier, bois de coffrage), et les agrégats adaptés (sable et graviers) ne sont pas toujours disponibles localement. Ils sont, de fait, souvent inaccessibles à une large majorité des populations.

Une alternative

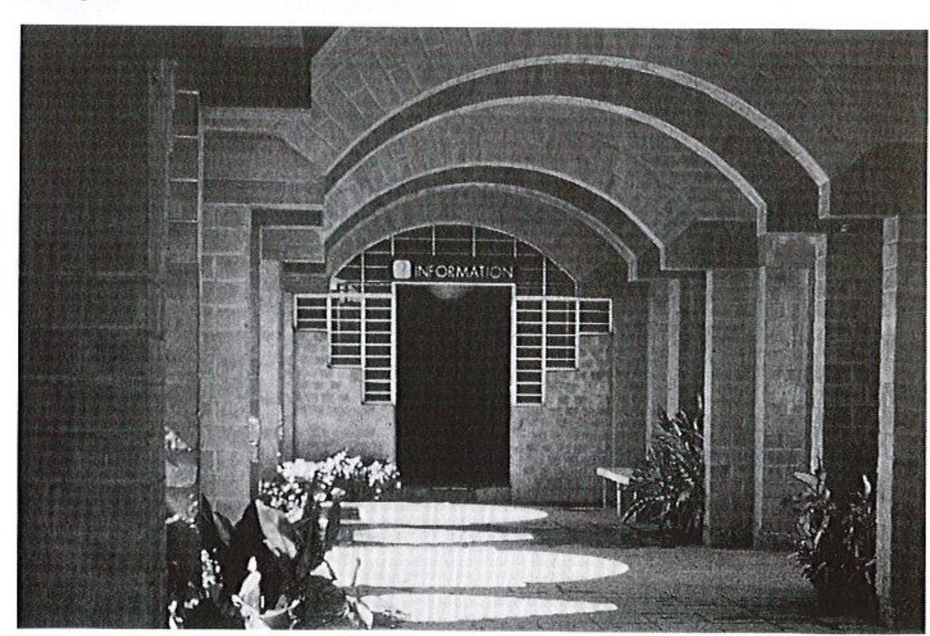
Les techniques traditionnelles, leurs adaptations et les nouvelles techniques importées ne solutionnent donc pas toujours le problème de toiture en harmonie avec les conditions locales: culturelles, climatiques ou encore économiques. De fait, il y a un besoin pour des solutions alternatives de toiture. La construction en arcs, voûtes et coupoles est, dans de nombreux cas, une de ces solutions.
Les nombreuses variantes et un large éventail de solutions architecturales permettent de s'adapter à des situations très variées.



Centre de recherche à Dakar, Sénégal.

Avantages des arcs, voûtes et coupoles

Les arcs, voûtes et coupoles se construisent avec des matériaux simples qui peuvent souvent être les mêmes que ceux utilisés pour les murs.
Ces matériaux se trouvent ou peuvent être produits localement. La construction est donc peu coûteuse, favorise la création d'emplois et permet de faire des économies de devises.
Il n'est pas nécessaire d'utiliser du bois, ce qui permet aussi d'éliminer tous les risques d'incendie.
L'effet de masse des maçonneries en arcs, voûtes et coupoles procure une très bonne inertie thermique qui améliore le confort dans les régions au climat sec.
Cette masse procure aussi une bonne isolation phonique.



Centre d'information et de réception d'Auroville, Inde. Prix International Hassan Fathy 1993.

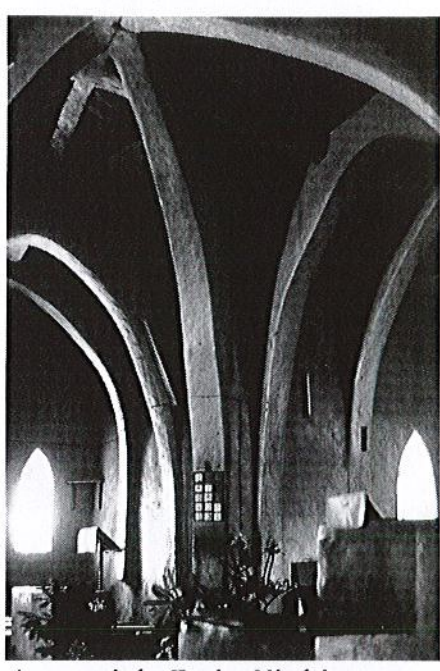
AVANTAGES ET POSSIBILITÉS

Considérations économiques

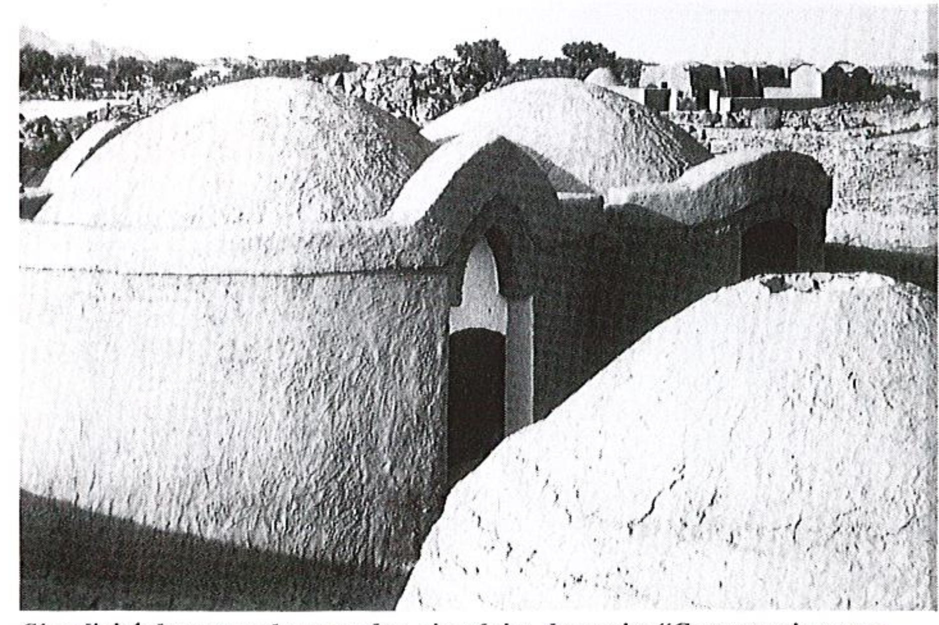
Le coût des constructions en arcs, voûtes et coupoles varie en fonction des matériaux employés, de la complexité de conception et des techniques de construction, de la dimension des ouvrages et de la protection de surface.
Les constructions employant la brique de terre crue (adobe) et protégées par un enduit de terre peuvent être construites pour un coût inférieur aux constructions traditionnelles de standing identique. En général, des réalisations faites de matériaux résistant à l'eau et protégées par une étanchéité durable, coûtent plus cher que des bâtiments simples couverts de tôles mais elles restent moins chères que les constructions couvertes de dalles en béton armé.

Création d'emplois

La construction d'arcs, voûtes et coupoles est très mobilisatrice de main-d'œuvre. Cette technologie a donc un fort potentiel de création d'emplois, non seulement pour ce qui est de la construction, mais aussi pour la production des matériaux de construction.



Arcs croisés, Zaria, Nigéria.



Simplicité des coupoles sur plan circulaire du projet "Construction sans bois".

Économie de devises

Les matériaux de base sont généralement disponibles sur place et leur transformation ne nécessite que peu d'énergie. Il est ainsi possible de réaliser d'importantes économies de devises; de plus les frais de transport peuvent être réduits.
La construction en arcs, voûtes et coupoles mobilise peu d'investissement en matériel de chantier. Celui-ci peut se fabriquer localement sans difficultés majeures.

Un grand potentiel esthétique

Les nombreuses possibilités de formes, de dimensions, de combinaisons d'éléments et de types de finitions permettent la création d'espaces de grande qualité. Ainsi, les arcs, voûtes et coupoles peuvent s'utiliser non seulement pour des programmes de logements économiques mais aussi pour des réalisations de standing et de luxe.

Limites d'utilisation

Localement, certaines conditions particulières peuvent limiter l'intérêt de l'utilisation des arcs, voûtes et coupoles. Les plus courantes sont:

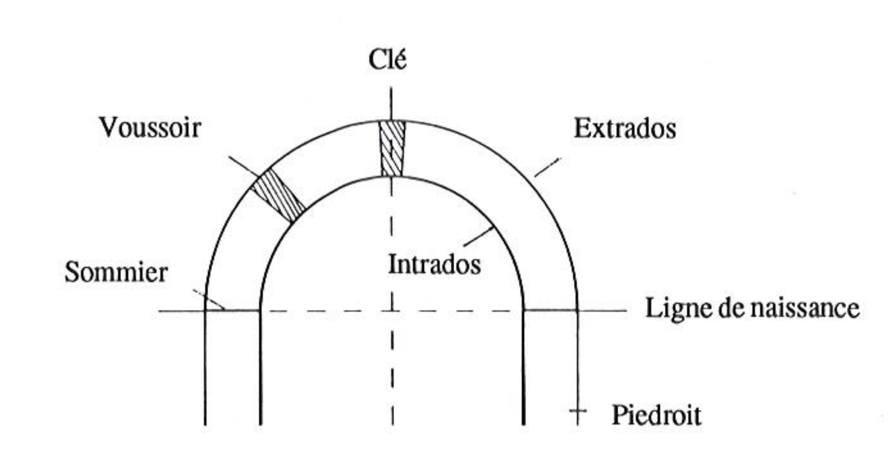
- le rejet par la population pour des raisons culturelles,
- le coût trop élevé de la main-d'œuvre qualifiée,
- le coût trop élevé des matériaux de construction adaptés,
- l'utilisation en zone sismique demande une attention particulière,
- l'absence de normes de construction.

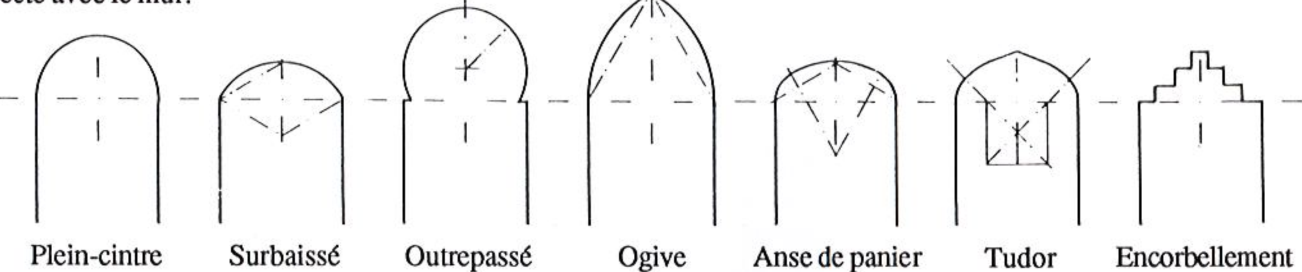
Pour garantir les avantages que représente l'utilisation des arcs, voûtes et coupoles, il faut bien maîtriser la technologie et savoir l'adapter à chaque nouveau contexte.

UTILISATIONS DES ARCS

Formes d'arcs

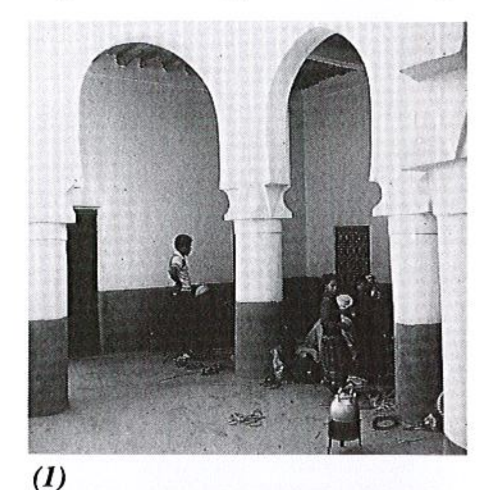
Il existe de très nombreuses formes d'arcs. Elles sont principalement caractérisées par la courbure de l'intrados et le rapport flèche-portée. La plupart des arcs sont liés au mur par leur extrados. L'arc en encorbellement, bâti par des porte-à-faux successifs et les arcs en matériaux monolithiques coulés, damés ou creusés, n'ont pas d'extrados et sont en continuité directe avec le mur.



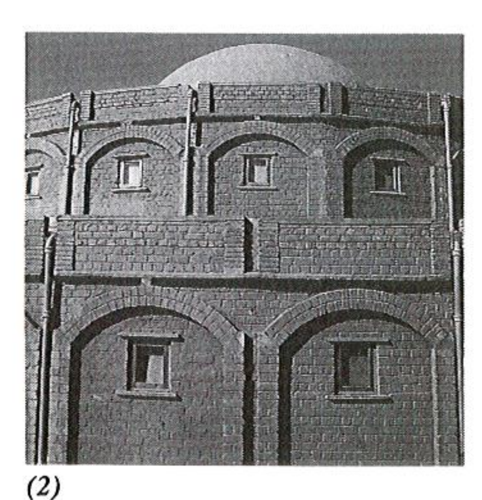


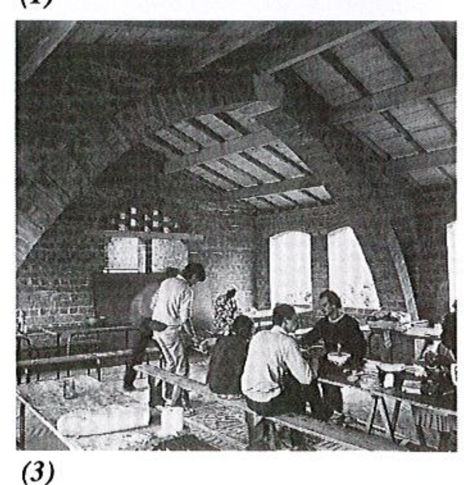
Utilisations diversifiées

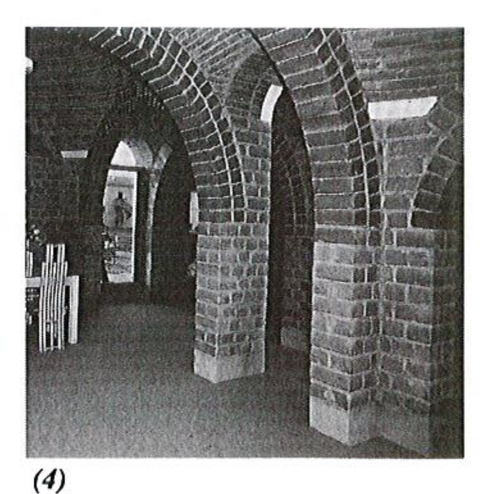
La principale fonction d'un arc est de permettre la création d'une ouverture dans un mur.
Par juxtaposition et répétition d'arcs montés sur des piliers, on obtient des arcades (1) qui permettent la création d'espaces couverts très ouverts.
L'arcature (2), arc aveugle, permet d'alléger une maçonnerie mais peut être utilisée à titre décoratif.


(1)

L'arc diaphragme (3) sert d'élément porteur intermédiaire dans une grande pièce supportant des éléments de couverture de dimensions réduites.
Un arc peut servir directement de sommier à une coupole (4). Dans ce cas, les formes de l'arc et de la coupole sont intimement liées.


(2)


(3)


(4)

VOUTES

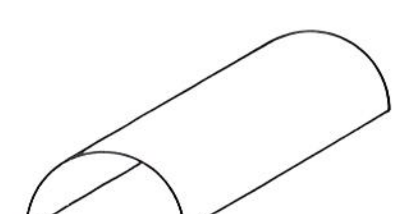
Formes de voûtes

Les formes de voûtes sont très nombreuses. Les plus simples sont les voûtes en berceau qui sont, en fait, une succession d'arcs identiques. Les voûtes en berceau peuvent adopter des courbures variées: plein-cintre, surbaissée, ogivale, etc. La voûte parabolique ou en "chaînette" est très courante car sa forme offre les meilleures conditions de stabilité avec un minimum de matière.

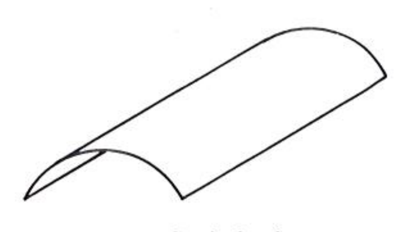
La combinaison de deux voûtes en berceau de même courbure permet de définir deux autres types: la "voûte d'arête" et la "voûte en arc de cloître". En allongeant un des deux berceaux, la "voûte en arc de cloître" devient une "voûte en auge".
La combinaison de voûtes, en berceau de flèches différentes, forme des "voûtes à lunette".

Une "voûte en arc de cloître", dont les arêtes sont arrondies en forme de cône à partir des angles, devient une "voûte en trompes d'angles". De même, la "voûte en auge" peut évoluer en "voûte en navette".

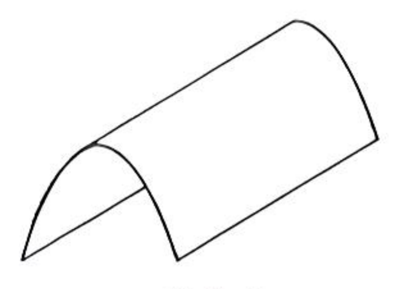
Voûte en berceau



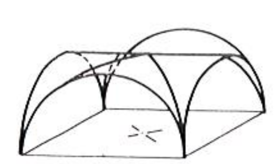
Plein-cintre



Surbaissé



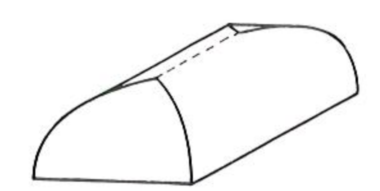
Chaînette



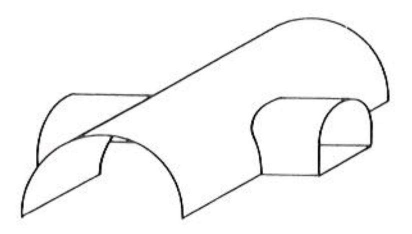
Voûte d'arête



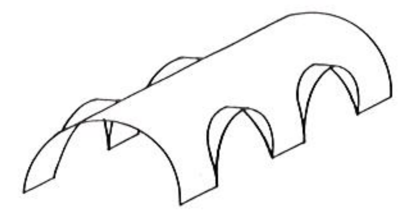
Voûte en arc de cloître



Voûte en auge



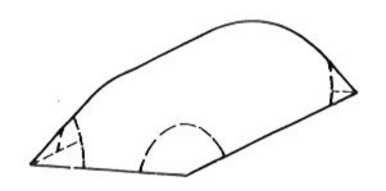
Voûte avec lunette



Voûte avec lunette



Voûte en trompes d'angles



Voûte en navette

COUPOLES

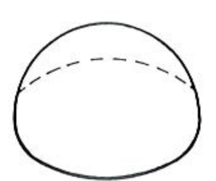
Formes des coupoles

Les coupoles sont obtenues par rotation d'un arc, hormis les coupoles à facettes qui s'apparentent plutôt aux voûtes en arc de cloître. Une coupole peut être plein-cintre, surbaissée, ogivale, conique, etc.

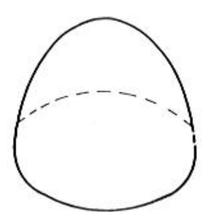
Les coupoles ont un plan circulaire. Leur utilisation sur des pièces de plan carré est toutefois possible avec l'utilisation de pendentifs ou de trompes. Les coupoles en pendentifs permettent de couvrir tous les types de plans polygonaux.

La combinaison de plusieurs coupoles est possible de même que la combinaison avec des voûtes.

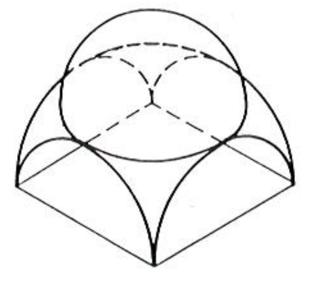
Coupoles

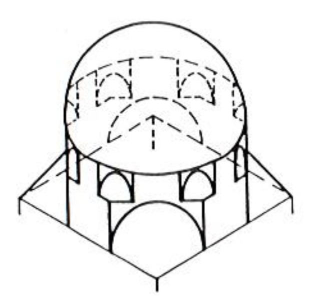

Plein-cintre

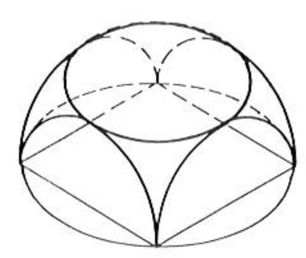

Surbaissée

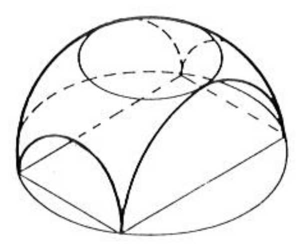

En ogive

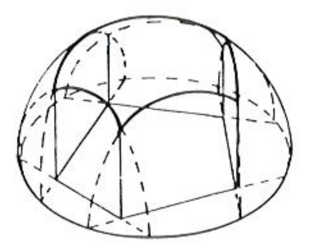

A facettes

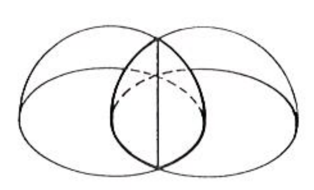

Coupole sur pendentifs

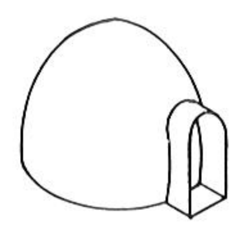

Coupole sur trompes

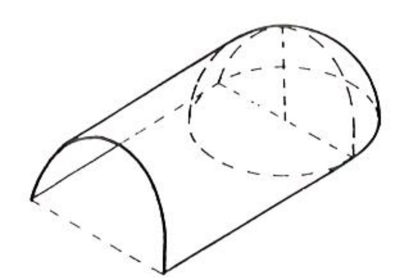

Coupole en pendentifs
Plan carré


Coupole en pendentifs
Plan rectangulaire

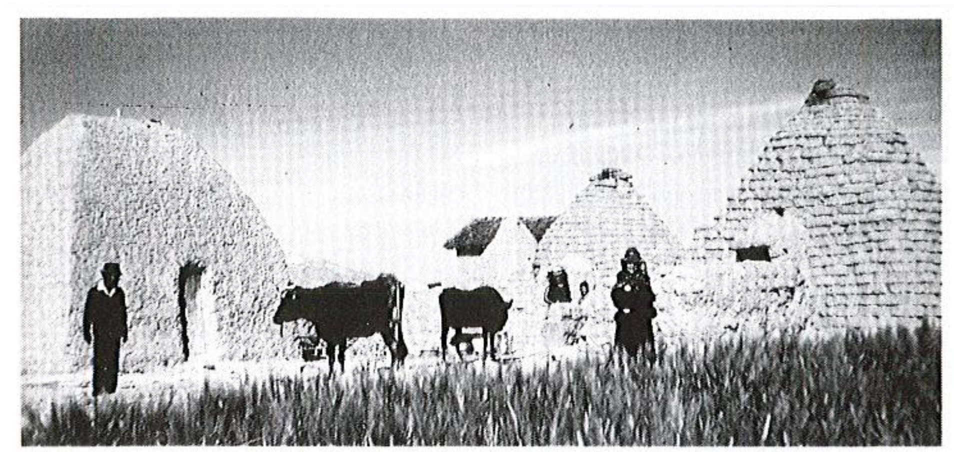

Coupole en pendentifs
Plan polygonal


Combinaison de coupoles


Coupole avec lunette


Coupole et voûte en berceau

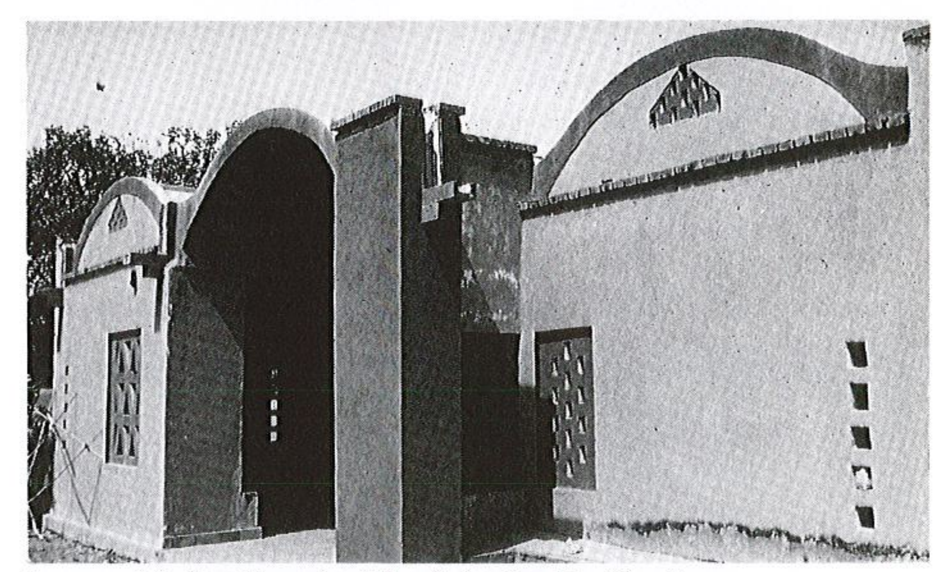
UTILISATIONS DES VOUTES ET COUPOLES


Habitations rurales près du lac Titicaca en Bolivie.

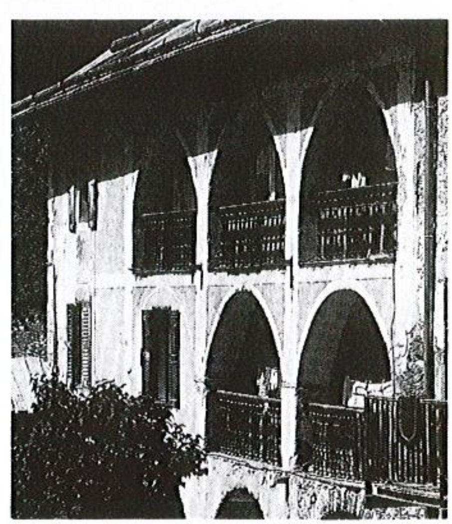

Voûtains en adobes.

Utilisations diversifiées

Les voûtes et les coupoles couvrent des espaces en ayant ou non recours à des murs ou autres supports. Toutefois, ce ne sont que des structures et elles ne deviennent couvertures que si elles sont revêtues d'une étanchéité.
Des toitures plates ou inclinées et des planchers sont facilement obtenus par remplissage des formes arrondies.
Des voûtes en berceau surbaissées et de faible portée, construites entre poutrelles, servent à la réalisation de planchers. On les appelle des voûtains.


Logement de fonctionnaire à Kamboincé au Burkina Faso.


Grange bâtie en pierres et couverte de lauzes, Causse Méjean, France.


Ferme bâtie avec plusieurs niveaux de voûtes d'arêtes, Queyras, France.

PROJETS DE DÉVELOPPEMENT

Habitat et développement

Dans le contexte d'application d'une politique de développement, les programmes réalisés par des organisations gouvernementales et non gouvernementales visent non seulement la production de bâtiments mais aussi des retombées sur la situation socio-économique des populations.
Pouvant satisfaire aux exigences de programmes d'habitat de nombreux pays, la construction en arcs, voûtes et coupoles répond souvent aux objectifs annexes que sont la création d'emplois et l'utilisation privilégiée des matières premières et des matériaux locaux.

Activités préalables

Des études préalables ainsi que des étapes d'expérimentation et de formation permettent de garantir le succès d'un projet de développement.
Dans les cas où il n'existe aucune tradition, ces études préalables représentent un investissement important. De fait, les organisations ont un rôle majeur car les programmes importants permettent d'amortir facilement ce type d'investissement.

Réalisation

La réalisation d'un programme de construction devrait toujours s'inscrire dans une perspective et une stratégie de développement.
Dans tous les cas, la formation professionnelle qui est dispensée au cours de la réalisation du projet constitue un acquis qui peut profiter à la communauté.
L'implication des tâcherons et entrepreneurs locaux, des architectes, ingénieurs et dessinateurs-projeteurs, permet de garantir la possibilité d'une reproduction spontanée et correcte des modèles de construction proposés et leur vulgarisation.



La reproduction spontanée des modèles proposés est un signe de la réussite d'un projet de développement ; projet "Construction sans bois" au Niger.

MARCHE DE LA CONSTRUCTION

Valorisation des matériaux de construction

La construction d'arcs, de voûtes et de coupoles valorise les matériaux de construction. Des structures et des architectures démonstratives permettent d'illustrer leur qualité, et de renforcer leur crédibilité auprès du public. Ceci peut concourir fortement à l'acceptabilité de nouveaux matériaux sur le marché.

Valorisation de l'entreprise

Faisant appel à une technicité et à des savoir-faire toujours impressionnants pour les non-professionnels, la construction en arcs, voûtes et coupoles valorise l'entreprise et lui donne une image de marque intéressante.

Qualité

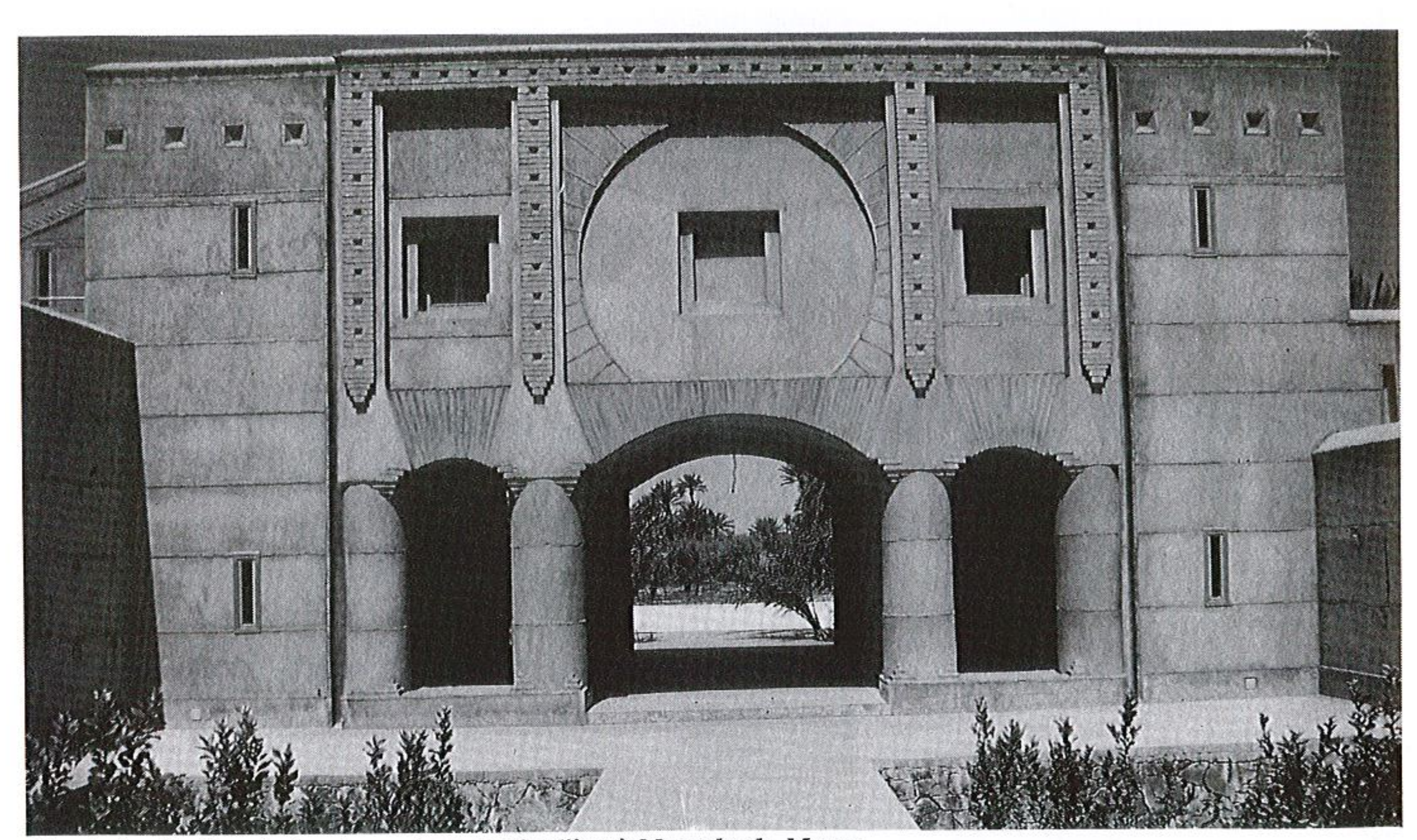
La qualité des constructions dépend de la qualité des matériaux de base et de la mise en œuvre. Leur durée de vie sera liée à la bonne mise en œuvre de la protection de surface ou de l'étanchéité.
Pour garantir la qualité et la durabilité des constructions, le maître d'œuvre doit bien contrôler ses approvisionnements et la mise en œuvre sur le chantier. Par ailleurs, l'entretien éventuel de la protection de surface, la technique et la fréquence, doivent être signalés au client.

Nouveaux marchés

S'engager dans la construction de bâtiments en arcs, voûtes et coupoles peut représenter une ouverture sur de nouveaux marchés, publics ou privés. Ceci est d'autant plus vrai que cet engagement se fait en liaison avec des programmes pilotes ou de promotion.

Investissement

Les investissements nécessaires à la construction en arcs, voûtes et coupoles peuvent être très réduits car le matériel est simple et peut être fabriqué localement.
Par contre, avant de débuter, l'entrepreneur doit investir dans la formation de son personnel.



Une technologie valorisante, maison particulière à Marrakech, Maroc.

QUESTIONS CLÉS

Si l'on est intéressé par la construction d'arcs, de voûtes et de coupoles, il convient de prendre conscience des implications que cela entraîne à différents niveaux :

- l'acceptabilité des modèles architecturaux,
- les matériaux de construction,
- la maîtrise des techniques de construction,
- les coûts, la gestion et l'investissement.

10 questions clés

1 - Existe-t-il une demande pour une solution alternative de toiture ou pour l'amélioration de techniques traditionnelles de construction en arcs, voûtes et coupoles ?

2 - Pensez-vous que le public appréciera les constructions en arcs, voûtes et coupoles ?

3 - Des matériaux adaptés sont-ils disponibles localement ? Est-il possible d'en produire ?

4 - Avez-vous une solution adaptée pour la protection de surface ou l'étanchéité ?

5 - Etes-vous bien conscient que tous les types de toiture nécessitent un entretien périodique ?

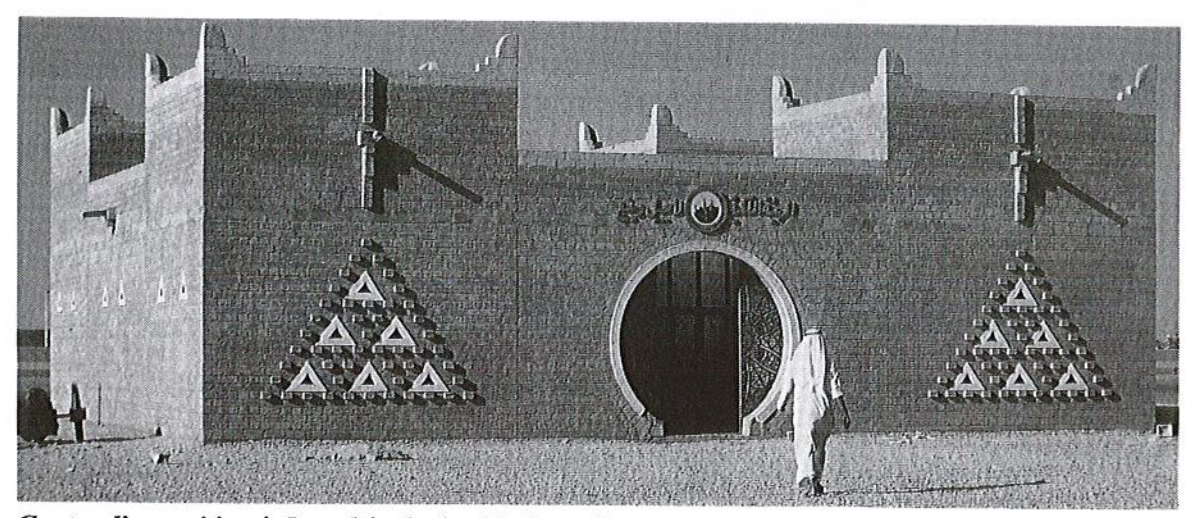
6 - Réalisez-vous qu'il vous faudra revoir une grande partie de vos méthodes de construction ?

7 - Y a-t-il dans votre région des problèmes liés aux tremblements de terre ou aux sols gonflants ?

8 - Etes-vous disposés à procéder à un investissement en équipement et en études techniques ?

9 - Etes-vous disposés à accorder une attention toute particulière à la formation ?

10 - Savez-vous où trouver un appui sur le plan technique et pour la formation ?



Centre d'exposition à Janadriyah, Arabie Saoudite.

CONSEILS

Si en répondant aux dix questions clés vous concluez qu'il existe un potentiel intéressant, il est recommandé de procéder à une étude de faisabilité fine de façon à élaborer un programme d'activités permettant le succès de la construction de bâtiments avec des arcs, voûtes et coupoles.

Étude de faisabilité

Elle devrait comprendre six volets principaux :

1 - Socio-culturel :	analyse de la demande, acceptabilité par la population
2 - Économique :	standing des constructions, coûts, accessibilité, crédits, état du marché
3 - Aspects techniques :	matériaux de structure et d'étanchéité, résistance, normes en vigueur
4 - Climatique et géographique :	climat, environnement, désastres naturels
5 - Institutionnel, public/privé :	institutions et leur rôle, politiques, moyens et capacité
6 - Formation et savoir-faire :	niveau, expériences, capacité de formation ou de transfert

Étapes ultérieures

En se basant sur les résultats de l'étude de faisabilité, il est possible d'élaborer des recommandations et une stratégie d'action. Une attention particulière doit être portée aux aspects suivants :

1 - Choix architectural

Il doit être fait en tenant compte des références culturelles.

2 - Choix techniques

Il faut prendre en compte le degré de complexité des principes constructifs et de la réalisation, la souplesse d'adaptation et la possibilité de reproduction des modèles.

3 - Démonstration

Des constructions tests doivent être réalisées pour permettre de vérifier l'acceptabilité des modèles proposés, d'affiner les choix techniques et architecturaux, d'améliorer le niveau global du savoir-faire et par là-même la qualité des réalisations.

4 - Formation professionnelle

Elle doit être assurée à tous les niveaux afin de mettre en place des équipes capables de prendre en charge des projets de la conception à la construction, ainsi que l'entretien des bâtiments.

5 - Assurer la qualité

On mettra en place des moyens permettant le contrôle de la bonne exécution des ouvrages.

6 - Assistance technique

Durant un minimum de temps, il faut garder des contacts avec des partenaires compétents qui peuvent fournir une assistance technique ou des conseils.

7 - Commercialisation

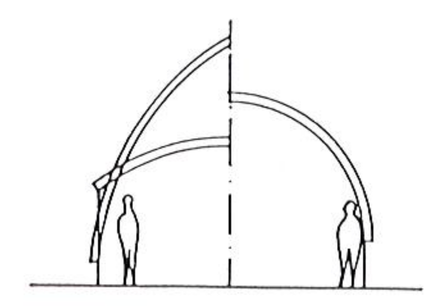
Des activités promotionnelles et commerciales sont souvent nécessaires pour s'assurer du minimum de travail permettant d'amortir les investissements faits en matériel et en formation.

CHOIX CONSTRUCTIFS
CONCEPTION ARCHITECTURALE

Faire des choix
Chaque arc, voûte et coupole a des propriétés et des capacités techniques et architecturales spécifiques. Il convient donc de bien connaître les différentes familles de systèmes constructifs et les possibilités architecturales qui en découlent, de façon à pouvoir faire des choix pertinents. Ces choix auront une influence très forte sur l'acceptation et l'appropriation de la technologie. On fera attention à bien prendre en compte toutes les facettes des besoins et des contraintes du projet.

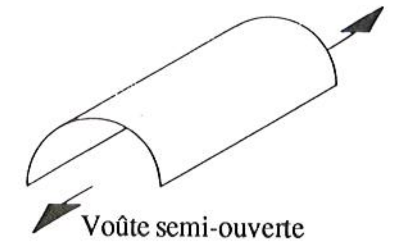
Construction
Les diverses formes d'arcs, voûtes et coupoles sont étroitement liées à une ou plusieurs méthodes de construction. Elles sont plus ou moins économiques selon le besoin en équipement spécifique et la difficulté de mise en œuvre. La question de l'échafaudage est aussi un facteur important et peut déterminer des dimensions optimales, notamment pour la flèche.

Considérations spatiales
Les formes courbes générées par les arcs, voûtes et coupoles définissent des hauteurs libres variables qui s'accentuent avec l'augmentation de la portée et de la flèche. Selon les besoins on définira la courbure de l'élément et la hauteur de sa ligne de naissance.
La liberté de passage d'un espace à l'autre est liée à la capacité naturelle d'ouverture entre l'intérieur et l'extérieur d'une voûte ou d'une coupole. On distingue le type ouvert, le type semi-ouvert et le type fermé .





Voûte ouverte

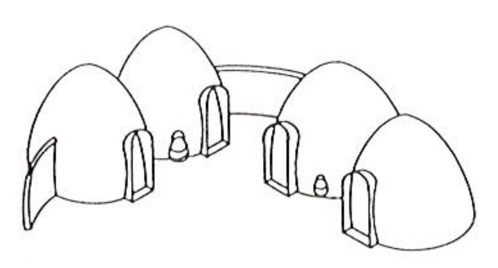


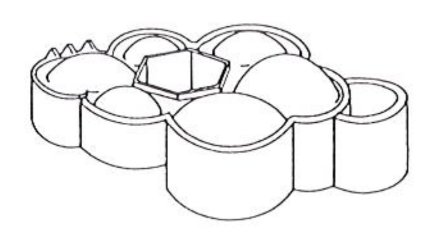
Voûte semi-ouverte

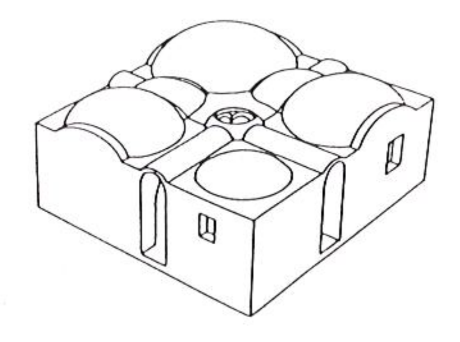


Voûte fermée

Complexité constructive
L'éventail des systèmes constructifs utilisant des structures en arcs, voûtes et coupoles va du plus simple au plus complexe. On distingue principalement les modules indépendants les uns des autres (accolés ou non) des systèmes sophistiqués qui suivent des trames géométriques très rigoureuses.
Les systèmes sophistiqués permettent d'utiliser au mieux la matière et sont très performants du point de vue du coût. D'un autre côté, la reproductibilité est délicate car une bonne précision à l'implantation est nécessaire.
En règle générale, plus la forme des voûtes ou des coupoles est apparente dans l'aspect architectural, plus la construction est économique.
Toutefois, certains modèles permettent un passage simple et économique à des toitures plates ou inclinées.







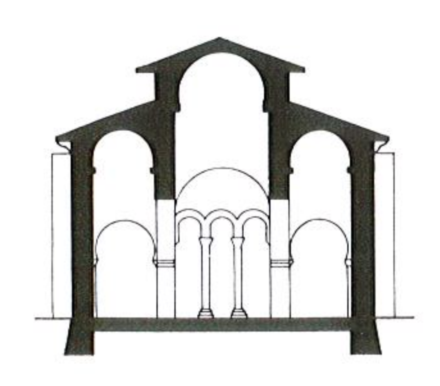
Conception de bâtiments : du plus simple au plus complexe.

Aspect architectural

Les arcs, voûtes et coupoles offrent de très nombreuses possibilités architecturales plus ou moins typées. Elles dépendent des matériaux et des modèles utilisés, des modes d'utilisation et enfin des techniques de construction qui leur sont associées. L'aspect architectural est l'un des principaux vecteurs de l'acceptabilité culturelle et sociale d'une technologie.



Coupe d'une maison, Sfax, Tunisie.



Coupe d'une église, Valladolid, Espagne.

Conception de bâtiments de formes diverses, toitures courbes, plates ou inclinées.

Acoustique

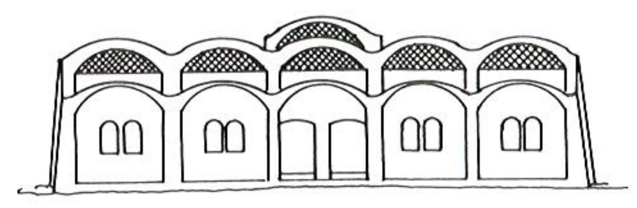
La forme arrondie des voûtes et surtout des coupoles peut engendrer une réverbération importante qui peut être utile ou gênante selon l'utilisation de l'espace. Des dispositions simples, comme des éléments disposés en encorbellement ou des tissus suspendus, permettent de réduire cette réverbération.

Stabilité des arcs, voûtes et coupoles

Pour garantir la stabilité, la forme doit s'approcher le plus possible du funiculaire des charges. Pour des charges uniformément réparties, la meilleure forme approche celle d'une chaînette suspendue. Ceci concerne les formes surbaissées autant que les formes surhaussées. La section idéale correspondant à une coupole est quelque peu différente et peut seulement être calculée graphiquement et mathématiquement. La combinaison de voûtes et de coupoles engendre des stabilités plus complexes mais permet des formes beaucoup plus libres.

Stabilité des supports

Les arcs, voûtes et coupoles sont des éléments de couverture assez lourds. Ils engendrent des poussées qui augmentent avec le surbaissement, la portée et le poids. Ces poussées sont concentrées ou réparties. Elles ont tendance à renverser les supports (murs, piliers et fondations) et doivent être prises en considération. Les solutions les plus courantes sont: annulation par juxtaposition, élargissement du mur, contreforts et enfin tirants ou chaînage.

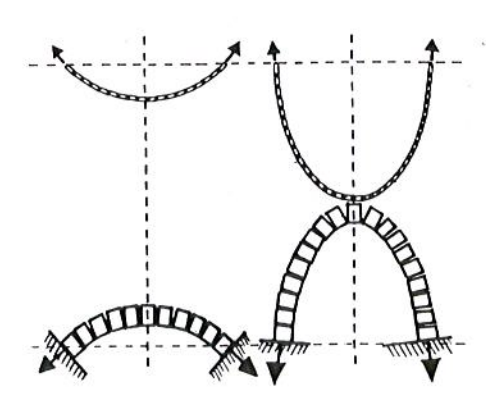


Projet pour une école primaire, Sénégal.

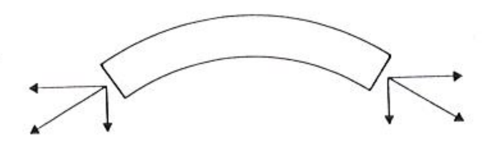
Détails et finitions

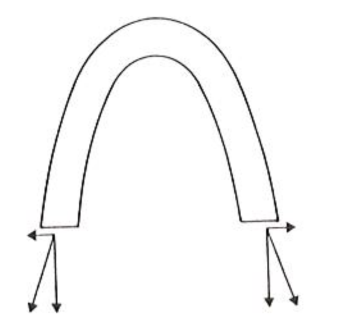
Les détails et finitions peuvent influer sur les choix de structures. On doit penser plus particulièrement:

- à l'appareillage, surtout pour les maçonneries apparentes,
- au cheminement et l'évacuation de l'eau de pluie,
- aux menuiseries.



Diverses formes de "chaînette".





Les arcs surbaissés engendrent des poussées plus importantes que les arcs surhaussés.

MATÉRIAUX

Les matériaux nécessaires pour la maçonnerie d'arcs, voûtes et de coupoles se répartissent en deux familles, les composants solides (adobe, pierre, etc.) et les mortiers. Les composants solides assurent la résistance en compression. Les mortiers assurent une transmission des efforts en compression et la cohésion générale.
Pour éviter les risques de retrait après la mise en œuvre, il est préférable d'utiliser un minimum de mortier.
Il y a rarement incompatibilité entre les divers composants solides et plastiques bien que la solution optimale soit d'avoir des composants de résistance similaire.

Composants solides

Pierre
Elle présente souvent des dimensions très irrégulières obligeant l'utilisation de techniques de préparation ou de mise en œuvre très coûteuses. Les pierres tendres et légères offrent des possibilités intéressantes, de même que les pierres litées qui peuvent être standardisées par simple dégrossissage.



Moulage de blocs d'adobe au format adapté.

Bloc d'adobe
Simple, très économique et d'un format pouvant être facilement adapté aux diverses techniques de mise en œuvre, c'est le matériau le plus utilisé. Ses performances mécaniques plutôt faibles imposent la construction de structures assez massives.

Bloc de terre comprimée stabilisée
Insensible à l'eau et de bonne résistance mécanique, il est une alternative à la brique de terre cuite à un coût souvent très inférieur. La plupart des presses utilisées pour sa fabrication sont adaptables pour la production de blocs spécifiques.

Blocs pleins moulés
Faits à partir de mortier de sable-ciment ou de sable-plâtre, ils ont été utilisés pour des réalisations très diverses car de nombreux formats d'éléments simples mais aussi des pièces spéciales peuvent être préparés.

Brique de terre cuite
C'est un matériau plus cher mais qui offre en général de bonnes performances, ce qui permet des réalisations plus légères ou de dimensions plus importantes. Des formats spécifiques peuvent être obtenus, dépendant du mode de production.

Brique cuite creuse
Elle permet des techniques de mise en œuvre spécifiques et des constructions très légères. Des matériaux réalisés selon les méthodes de poterie artisanale permettent des réalisations similaires.

Mortiers

Mortier de terre
Il est utilisé pour lier l'adobe, la brique cuite ou la pierre. Grâce à sa bonne adhérence, il permet la construction de voûtes et de coupoles sans coffrage.
Certaines qualités de terre sont utilisées pour la réalisation de coupoles par façonnage manuel à partir d'un mortier plastique. Pour éviter d'avoir trop de retrait, on ajoute de la paille ou du sable aux terres trop argileuses.

Mortier de terre stabilisé
Le ciment, la chaux, le plâtre ou encore le bitume améliorent les caractéristiques du mortier de terre. Ces mortiers sont bien adaptés à la liaison de blocs de terre comprimée ou de terre cuite.

Mortier de chaux et sable
Il a des caractéristiques moyennes et pour principal avantage de garder une certaine souplesse. Son temps de prise est très long. Il peut être amélioré par ajout de briques pilées ou de pouzzolanes. Les mortiers à base de chaux sont très fréquemment associés à la brique cuite et à la pierre.

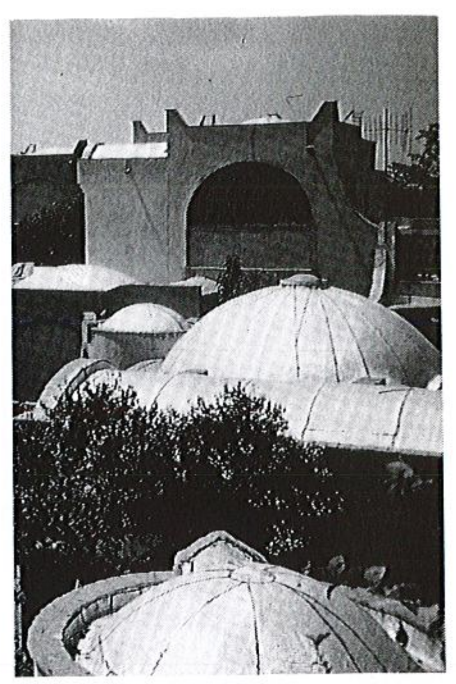
Mortier de ciment et sable
Vu le coût élevé du ciment, son dosage doit être modulé selon les besoins en résistance mécanique. Ce mortier convient pour lier la terre cuite de bonne qualité et les blocs de sable-ciment pleins. Peu collant, il est mal adapté aux méthodes de construction sans coffrage hormis la technique de l'encorbellement.
Des voûtes de portées moyennes ont été réalisées directement à partir de mortier de sable-ciment.
Des éléments de faibles dimensions peuvent être préfabriqués.

Mortier de plâtre
Il a une prise très rapide qui permet des techniques de mise en œuvre par collage.
Des voûtes de faibles portées peuvent être construites ou encore préfabriquées directement avec ce mortier.
La stabilité du plâtre à l'eau peut être améliorée par combinaison avec de la chaux.

Protections de surface

Pour éviter des infiltrations d'eau et par la suite des détériorations de la structure, les voûtes et les coupoles doivent être protégées des eaux de pluies, puis permettre leur écoulement et leur évacuation par des gargouilles ou des descentes d'eau.

Enduits
L'enduit de terre est le plus économique mais demande un entretien dont la fréquence dépend de la quantité et de la nature des pluies, mais aussi de la qualité de la terre employée.
L'enduit ciment-sable est trop rigide et fissure, ce qui permet des infiltrations. Il ne devrait pas être utilisé sans le complément d'une membrane.
Les enduits chaux-sable et plâtre-chaux-sable sont mieux adaptés du fait de leur plus grande souplesse, mais un minimum d'entretien reste souvent nécessaire.



Etanchéité multicouche

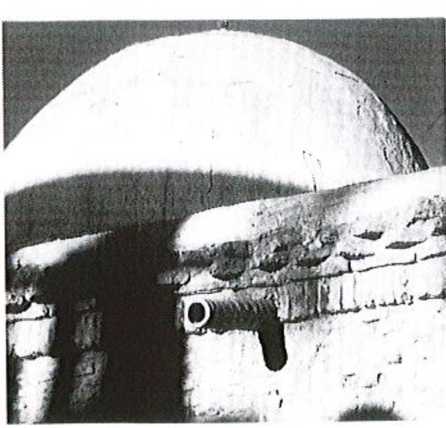


L'enduit de terre est efficace mais nécessite un entretien régulier.

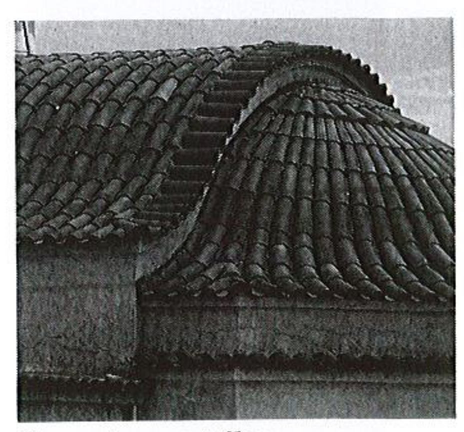
Couvertures
Certaines formes de voûtes et de coupoles peuvent être protégées par des couvertures de chaume, de pierres plates ou encore de tuiles. Ces solutions peu pratiquées dans les projets récents sont pourtant très efficaces et économiques.

Membranes
Les membranes à base de bitume mono ou multicouche, de peintures étanches ou encore de feuilles métalliques sont efficaces mais souvent trop chères.

Toitures plates et inclinées
Le passage à des surfaces plates ou inclinées se fait plus facilement avec certains types de voûtes et de coupoles. Le plus simple est d'utiliser un remplissage de terre compactée sur lequel est disposée l'étanchéité. Des solutions de charpentes très légères sont aussi bien adaptées.



Evacuation d'eau par gargouille



Couverture en tuiles

MISE EN ŒUVRE

Construction des arcs

Avec coffrage

La construction d'arc nécessite l'utilisation d'un coffrage qui a la forme de l'intrados de l'arc. Il peut être fait de bois ou de métal et doit être associé à un système permettant de le retirer facilement.

La plupart des formes d'arc permettent un décoffrage immédiat après leur construction. Le coffrage peut donc être réutilisé aussitôt. Dès lors, si l'on a un grand nombre d'arcs identiques à réaliser, on a intérêt à préparer un coffrage précis et solide qui garantira son réemploi et une réalisation à la fois économique et de qualité.

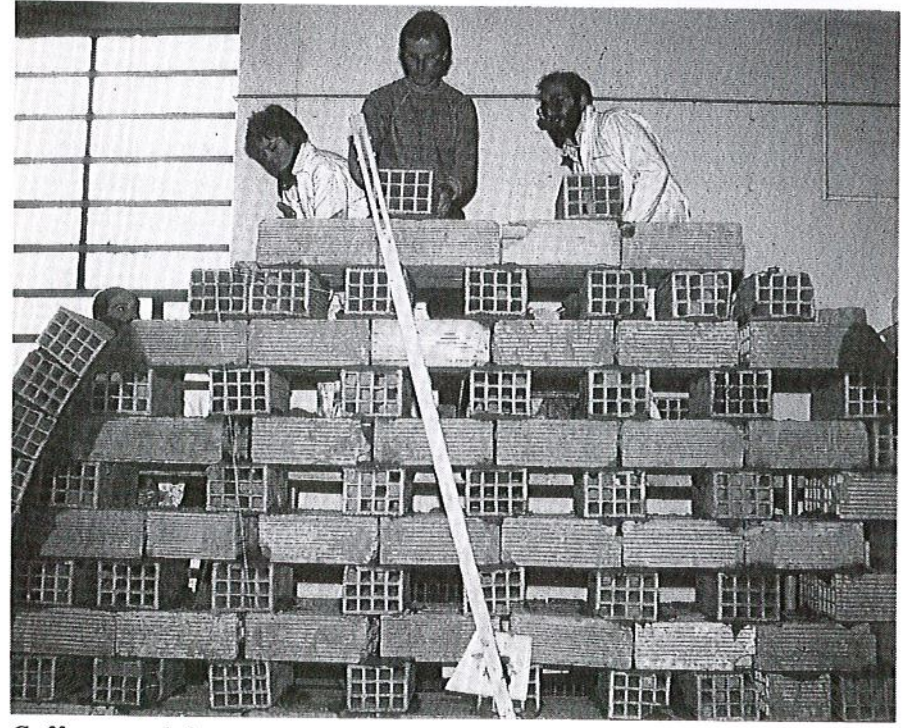
Réaliser le coffrage avec un empilage à sec de briques ou de blocs et en formant la courbure avec une couche de mortier est un système très économique.



Coffrage en bois



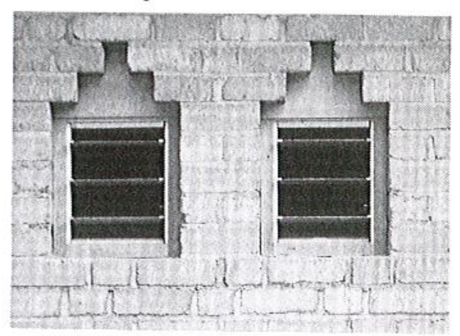
Coffrage métallique



Coffrage en briques

Sans coffrage

L'arc en encorbellement qui est réalisé par porte-à-faux successifs, les arcs creusés et les arcs façonnés sur armatures en bois, se réalisent sans coffrage.



Arcs en encorbellement

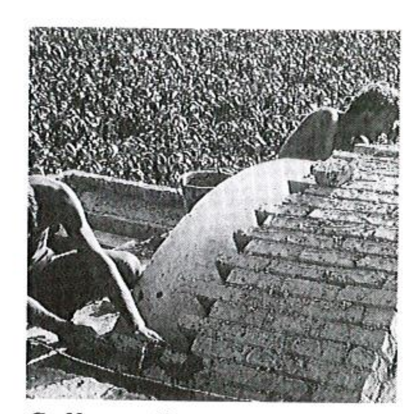
Construction des voûtes

La construction des voûtes peut se faire de façon similaire à celle des arcs.

Avec coffrage

La construction sur coffrage plein mis en forme sur place est réalisable. Elle est utilisée pour des planchers sur sous-sols.

La préparation d'un coffrage intégral est possible, mais difficile pour les formes complexes. Très lourd, il doit être assemblé puis démonté sur place. Cette technique reste toutefois économique si les voûtes et donc le coffrage sont légers.

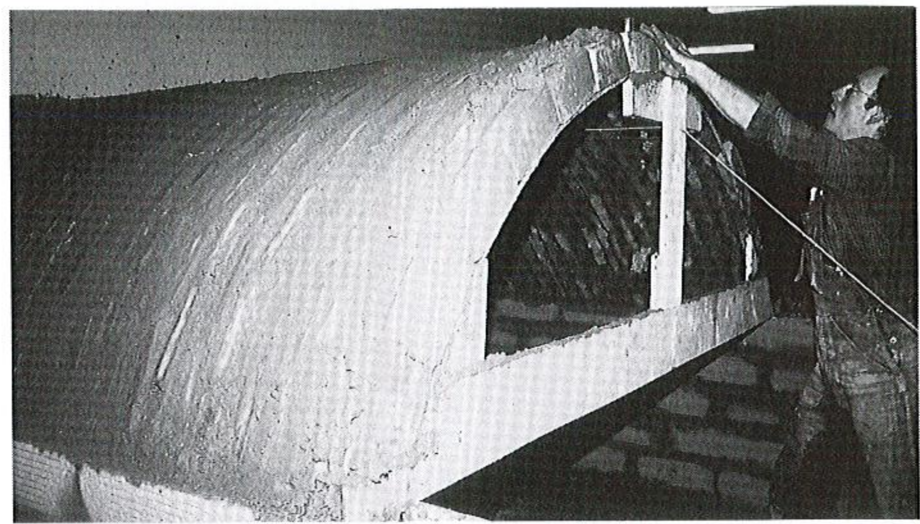


Coffrage glissant

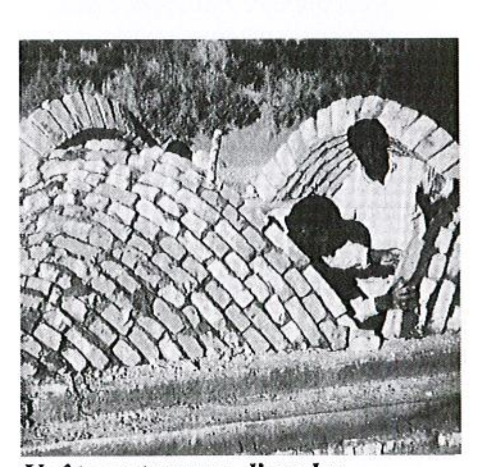
OUTILS ET SAVOIR-FAIRE

Coffrage glissant
La construction se fait par parties, le coffrage étant repositionné autant de fois qu'il est nécessaire. C'est une des méthodes les plus intéressantes mais elle ne concerne que les voûtes en berceau.

Sans coffrage
La construction de voûtes en encorbellement ne permet que des portées limitées.
La construction dite "par tranches", sans coffrage, est la méthode la plus économique. On utilise pour cela les propriétés de certains mortiers qui permettent de coller une brique à plat sur un plan quasi vertical. Pour faciliter le collage, les petits éléments doivent être d'épaisseur assez fine et leurs dimensions régulières.
Selon ce principe, et en faisant varier la forme et la dimension des assises, on peut réaliser des voûtes en berceau, des voûtes d'arêtes, en arc-de-cloître, en auge, en trompe d'angle et en navette.
Traditionnellement, toutes ces voûtes se construisent "à l'œil", mais il est possible d'utiliser des outils légers permettant de guider les maçons afin qu'ils réalisent correctement la forme voulue.



Construction d'une voûte en berceau par tranches



Voûte en trompes d'angles



Construction d'une coupole par assises tronconiques.

Construction des coupoles

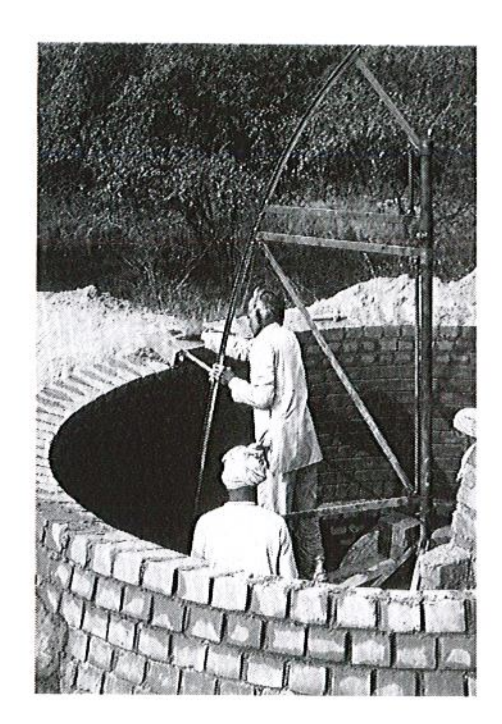
La construction des coupoles ne se fait que très rarement sur un coffrage tant ceux-ci sont complexes à fabriquer.

En encorbellement
Il permet de couvrir des grandes portées mais donne des formes coniques et des élancements importants.

Par progression d'anneaux tronconiques
Ces anneaux sont horizontaux et de diamètre décroissant et peuvent engendrer tous les types de forme.
Cette méthode utilise la même technique de pose que pour les voûtes par tranche.
Des guides simples tournant autour d'un axe, décrivant la forme dans l'espace peuvent être utilisés pour obtenir des formes justes et régulières.

Par façonnage
A partir de mortier de terre armé de paille, il est possible de construire des coupoles d'assez grandes dimensions. La mise en œuvre se fait par lits successifs.

FORMATION PROFESSIONNELLE



La formation est une nécessité

Les cursus de formation actuels enseignent très peu les particularités des structures et des techniques de mise en œuvre des arcs, voûtes et coupoles. Des formations spécifiques s'adressant à l'ensemble des opérateurs, des concepteurs aux réalisateurs doivent donc être mises en place.

Savoir concevoir

La conception de bâtiments en arcs, voûtes et coupoles fait appel à des connaissances spécifiques qui comprennent principalement la géométrie dans l'espace et les principes de stabilité. Les diverses solutions techniques ou variantes architecturales doivent être connues de façon à permettre l'adaptation de la technologie, la créativité et l'évolution.

Savoir construire

La construction d'arcs, de voûtes et de coupoles suit les règles principales de la maçonnerie mais les techniques particulières sont très courantes. Si elles font appel à des "tour de main" ou à des outils très spécifiques, ces techniques restent très simples et peuvent être maîtrisées rapidement. Les principes structuraux doivent être bien compris, permettant de s'adapter à des situations particulières ou nouvelles.
Si les formations "classiques" restent toujours les plus efficaces, la participation à des chantiers encadrés par du personnel qualifié est un bon moyen d'acquérir une compétence pratique à un coût de revient plus abordable.





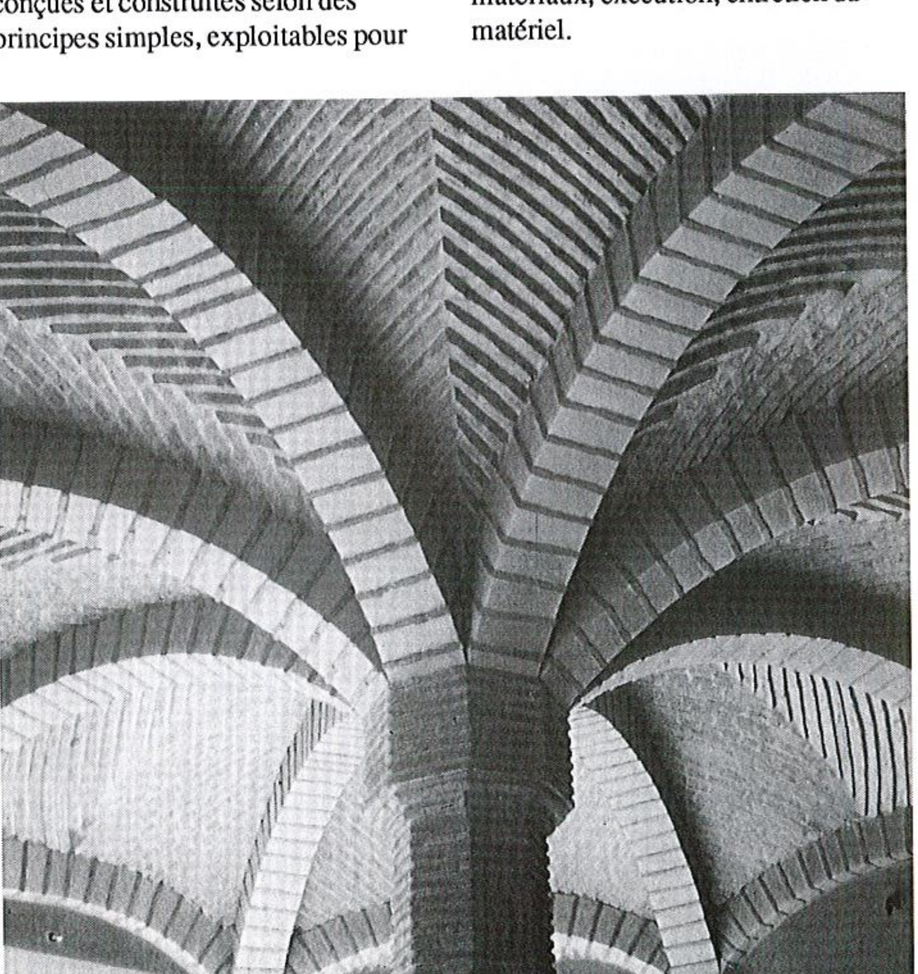
Après une formation théorique, l'apprentissage sur le chantier est indispensable pour acquérir une véritable compétence.

GESTION DE PROJETS

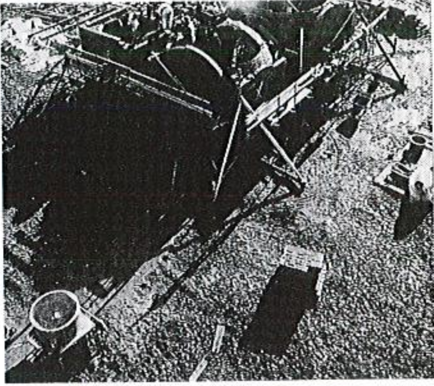
Le marché
Le marché de la construction est en général très conservateur et l'introduction de nouveautés dans un contexte bien établi n'est pas forcement aisée. Des efforts de promotion doivent donc être faits pour s'implanter sur le marché.

Promouvoir et informer
Des projets de démonstration sont indispensables. Il faut donc rechercher des occasions pour réaliser des chantiers témoins. Les constructions de "standing" sont intéressantes car elles sont appréciées par tous les publics et peuvent être conçues et construites selon des principes simples, exploitables pour un habitat plus économique.
Le public doit prendre connaissance des possibilités offertes par les constructions en arcs, voûtes et coupoles. Des actions d'information et de valorisation peuvent être envisagées autour des premières réalisations.
Enfin, la diffusion par les professionnels formés peut être très efficace.

Assurer la qualité
La meilleure qualité permet de gagner la confiance. Un soin particulier devra être apporté au contrôle sur le chantier : planning, matériaux, exécution, entretien du matériel.



La qualité de la finition, un atout majeur.



Une bonne organisation permet une réalisation très rapide; chantier d'une maison réalisée en 24 heures.

Gestion de chantier
Construire en arcs, voûtes et coupoles ne pose pas de problèmes de gestion particuliers.
Deux points doivent toutefois être considérés comme importants: l'équipement spécifique et les périodes de construction.

Équipement spécifique
Les coffrages d'arcs et les guides pour la construction des voûtes et des coupoles ne se trouvent pas dans le commerce. Il faut donc prévoir à l'avance leur fabrication.
Afin d'obtenir le meilleur amortissement, on peut, dès la conception du projet, prévoir plusieurs utilisations successives par la répétition de formes et de dimensions standard dans un bâtiment, voire dans plusieurs bâtiments différents.

Périodes de construction
Même si les matériaux employés résistent à l'eau, il est préférable de prévoir un planning de construction permettant de réaliser l'étanchéité des voûtes et des coupoles avant une saison pluvieuse qui devrait être consacrée aux finitions.

SÉLECTION BIBLIOGRAPHIQUE

ADAUA. *Rapport sur les techniques de construction mises au point par l'ADAUA entre 1977 et 1982 pour la promotion des matériaux locaux africains.* ADAUA, 1982.

Besenval R. *Technologie de la voûte dans l'Orient ancien. Tome 1 et 2. "Synthèse n· 15"*. France, Paris, Éditions Recherche sur les Civilisations, 1984. Tome 1 : 196 pp., tome 2 : 224 pp.

CRATerre, Doat P., Hays A., Houben H., Matuk S., Vitoux F. *Building with earth.* India, New Delhi, The Mud village society, 1991. 284 pp.

CRATerre, Houben H., Guillaud H. *Traité de construction en terre. L´encyclopédie de la construction en terre. Volume 1.* France, Marseille, Editions Parenthèses, 1989, 355 pp.

CRATerre : Dayre M., Doat P., Estève J., Guillaud H., Houben H., Joffroy Th., Rollet P. *Toitures en terre. Tome 1. Arcs, voûtes et coupoles.* Paris, France, Rexcoop, 1986. 247 pp.

Dellicour O., El Jack K., Posma L., de Walick P. *Le centre de formation agricole de Nianing.* Sénégal, Dakar, Dakar Regional Office for Education in Africa, 1978.

Department of Housing and Urban Development, Office of International Affairs. *Mud brick roofs. Ideas and methods exchange. n° 42.* USA, Washington, Department of Housing and Urban Development, Office of International Affairs, 1957. 14 pp.

Development Workshop. *Les toitures sans bois, guide pratique.* France, Lauzerte, Development Workshop, 1990. 77 pp.

Fathy H. *Construire avec le peuple. Histoire d'un village d'Egypte : Gourna.* France, Paris, Éditions SINDBAD. 305 pp.

Norton J., Tunley P. *Vulgarisation de la construction de voûtes et coupoles au Sahel. Phase 1 : l'identification de besoins.* Suisse, Gland, L'alliance mondiale pour la nature (UICN), Programme Sahel, 1990. 46 pp.

Steele J. *Hassan Fathy. Architectural monographs 13.* United Kingdom, London, Academy Editions, 1988.



Bureau du Centre d'Etudes de l'Energie à l'Institut de Technologie Indien (IIT), New Delhi, Inde.

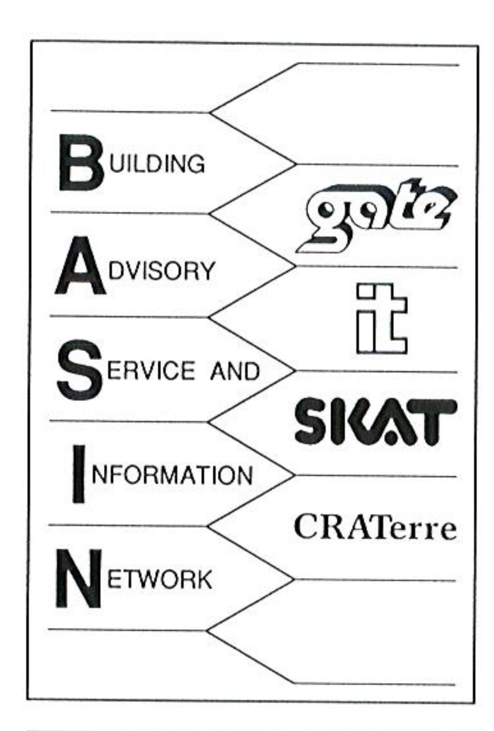
RÉFÉRENCES ET SOURCES

Sauf mentionné, toutes les photographies sont de l'auteur. Illustrations : Patrick Idelman.
Couverture : Construction d'une coupole étoilée en blocs de terre comprimée, Calvi, Corse, France.

p. 2 La ville de Théra à Santorin, îles des Cyclades, Grèce.
p. 3 Façade de la "Maison Andrioli" Fayoum, Egypte, 1984, Hassan Fathy, in Hassan Fathy, Architectural Monographs, voir bibliographie.
p. 4 Maison bâtie en adobes près d'Assouan en Egypte, photo : P. Doat.
p. 5 Bâtiment de la communauté Dar al Islam, Abiquiu, Nouveau-Mexique, USA, projet de l'architecte Hassan Fathy, photo : P. Odul.
Timbre postal édité au Niger en 1992 sur le thème de la construction sans bois.
p. 6 Bâtiment expérimental réalisé au Centre de Recherche pour l'Habitat Rural à Dakar, Sénégal.
Bâtiment du Centre d'information et de réception Auroville, Inde ; architectes S. Ayer-Guigan et S. Maïni.
p. 7 Intérieur de l'église St. Bartholomew, Zaria, Nigéria.
Maison construite selon les principes proposés par le projet "construction sans bois", Niger, conçue et réalisée par P. Tunley de Development Workshop, photo : A. Douline.
p. 8 Arcatures du mausolée provisoire de Indira Gandhi en Inde ; photo : H. Guillaud.
Maison rurale de la vallée du Dades, Maroc.
Intérieur du bâtiment de réception, Village du bout du monde, près de Mâcon, France.
Intérieur de la maison 24 heures, Grenoble, France.
p. 11 Habitations rurales en bordure du lac Titikaka, Bolivie ; photo : Th. David.
Voûtains en adobes sur troncs de palmier, Marrakech ; photo : P. Doat.
Habitation de fonctionnaire, centre de formation pour monitrices rurales, concu et réalisé par l'ADAUA, Kamboincé, Burkina Faso.
Grange, Causse Méjean, France ; photo : G. Beraldin.
Ferme dans le Queyras, France.
p. 12 Chantier de la maison 24 heures.
Maison construite selon les principes proposés par le projet "construction sans bois", Niger, concçue et réalisée par P. Tunley de Development Workshop ; photo : A. Douline.
p. 13 Maison particulière, Marrakech, Maroc, concue et réalisée par l'architecte E. Mouyal.
p. 14 Centre d'exposition, Janadriyah, Arabie Saoudite, concu et réalisé par CRATerre-EAG.
p. 18 Fabrication d'adobes spéciales pour la construction de coupoles, Marrakech, Maroc.
p. 19 Etanchéité multicouche, Centre panafricain pour le dévelopement, concu et réalisé par l'ADAUA,Ouagadougou,Burkina Faso.
Entretien de l'enduit de terre de la toiture de la mosquée de Zaria du musée de Jos, Nigéria.
Coupole et gargouille d'une maison de la ville de Tozeur, Tunisie.
Couverture en tuiles pour cette petite église de l'île de Santorin en Grèce.
p. 20 Coffrage en bois, Côte-d'Ivoire ; photo : Ph. Romagnolo.
Arcs en encorbellement, Passamainti, Mayotte.
Coffrage métallique, Auroville , Inde ; photo : S. Maïni.
Coffrage en briques, exercice construction, Ecole d'Architecture de Grenoble, France.
Construction d'une voûte avec un coffrage glissant, CSTB, Grenoble, France.
p. 21 Construction d'une voûte en berceau par tranche à l'aide d'un guide léger, exercice de construction, Ecole d'Architecture de Grenoble, France.
Construction d'une voûte en trompes d'angles, région de Tabas, Iran ; photo : Abedini-Rad.
Construction d'une coupole par assises tronconiques, près de Mâcon, France.
p. 22 Construction d'une coupole à l'aide d'un guide, Bureaux, IIT, architecte G. Minke, "Concept energy" : N.K. Bansal, Inde ; photo : G. Minke.
Formation de maçons, chantier de la maison 24 heures, réalisé par CRATerre-EAG avec l'AFPA (Association de Formation Pour les Adultes), Grenoble, France.
p. 23 Maison particulière, Marrakech, Maroc, concue et réalisée par l'architecte E. Mouyal.
p. 24 Bâtiment du bureau financé par la GATE/GTZ ; architecte : G. Minke, GhK, Allemagne, "Energyconcept" : N.K. Bansal, IIT, Inde ; photo : G. Minke.

Dos de couverture : Etapes de la construction de la maison 24 heures, CRATerre-EAG, J. Esteve.

BASIN



BASIN

Des matériaux et des techniques de construction, appropriés au contexte des pays en développement ont été étudiés, développés et mis en application dans de nombreuses régions du monde. Il existe, en effet, une nécessité pour proposer des solutions permettant de garantir des conditions d'habitat décentes et à un coût abordable pour une population toujours croissante.
Mais ces nouveaux développements ne peuvent contribuer à améliorer la situation tant que l'information n'atteint pas les constructeurs potentiels. La nature et la variété des sources d'information rendent son accès difficile.
Pour remédier à cet inconvénient, GATE, ITDG, SKAT et CRATerre coopèrent au sein du Réseau d'Information et de Conseil de la Construction, BASIN (Building Advisory Service and Information Network) qui couvre quatre secteurs techniques majeurs et qui coordonne la collecte, l'analyse et la diffusion de l'information.
Ces quatre groupes disposent d'une base de données commune concernant la littérature technique disponible, les technologies, les équipements, les institutions et les consultants ainsi que les projets et programmes en cours. De plus, à la demande, des documents ou des avis techniques peuvent être fournis. Des programmes de recherche, de formation ou opérationnels peuvent être mis en place en coopération avec des organisations locales si le besoin s'en fait sentir et que les circonstances le permettent.
BASIN est un service offert à toutes les institutions et les particuliers impliqués dans la construction, l'habitat et la planification, dans les pays en développement mais il ne peut fonctionner que dans le cadre d'échanges suivis et réciproques. C'est pourquoi tous les documents, les informations ou comptes-rendus qui sont communiqués à BASIN sont bienvenus car ils permettent à BASIN d'améliorer sa capacité à informer ceux qui le sollicitent.

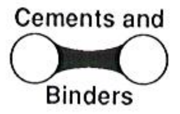




Service de conseil assuré par

WAS/BASIN
GATE-GTZ
P.O. Box 5180
D-65726 ESCHBORN
ALLEMAGNE
Tél. + 49 - 6196 - 79 31 90
Fax + 49 - 6196 - 79 73 52
Télex 407501-0 gtz d
Cables GERMATEC Eschborn

GATE (Centre d'Echanges Technologiques Allemand), un programme de la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, agit en tant que centre de diffusion et de promotion des technologies appropriées pour les pays en développement. Le Service d' Information et de Conseil sur les Technologies Appropriées (ISAT), un projet du GATE, a accumulé un savoir-faire spécifique dans le domaine de la construction de murs à travers ses propres programmes de recherche et de développement, études et publications. Ses capacités propres et une équipe d'experts sont à votre disposition pour fournir des conseils sur la construction de murs et les matériaux de construction de murs.





Service de conseil assuré par

ITDG
Myson House
Railway Terrace
GB-RUGBY CV21 3HT
ROYAUME UNI
Tél. + 44 - 788 - 560 631
Fax + 44 - 788 - 540 270
Télex 317466 itdg g
Cables ITDG Rugby

Intermediate Technology Development Group (ITDG) est une organisation anglaise, indépendante et à but non lucratif fondée par le Dr E.F. Schumacher, auteur de «Small is beautiful», pour contribuer à la création d'opportunités pour la création d'emplois et de ressources dans le secteur de la petite industrie dans les pays en développement. ITDG offre une compétence dans un nombre étendu de secteurs (par ex. mines, habitat, agro-alimentaire, textile), fournit des conseils techniques et une assistance pour le choix et la mise en œuvre de technologies appropriées contribuant à améliorer les capacités productives des communautés locales et des petites entreprises, et fournit d'autres services au travers des diverses organisations affiliées au groupe.



SKAT

Service de conseil assuré par

SKAT
Vadianstrasse 42
CH-9000 ST. GALLEN
SUISSE
Tél. + 41 - 71 - 237 475
Fax + 41 - 71 - 237 545
Télex 881226 skat ch
Cables LATAMI St. Gall

SKAT (Centre de Coopération Suisse pour la Technologie et le Management) est un centre de documentation et un groupe de consultants impliqués dans la promotion des technologies appropriées dans le Tiers Monde.
Les services offerts par SKAT sont : 1. Le service de réponses aux questions techniques; 2. Les études, les projets, les expertises; 3. Le centre de documentation; 4. La librairie; 5. L'édition ; 6. La coopération internationale ; 7. Les relations publiques pour les technologies appropriées.
Les principaux secteurs d'activité du SKAT sont les matériaux de construction, l'énergie (et en particulier les mini-centrales hydro-électriques), le développement des petites industries (en particulier pour le travail du métal),ainsi que l'eau, le traitement des eaux usées et l'assainissement.

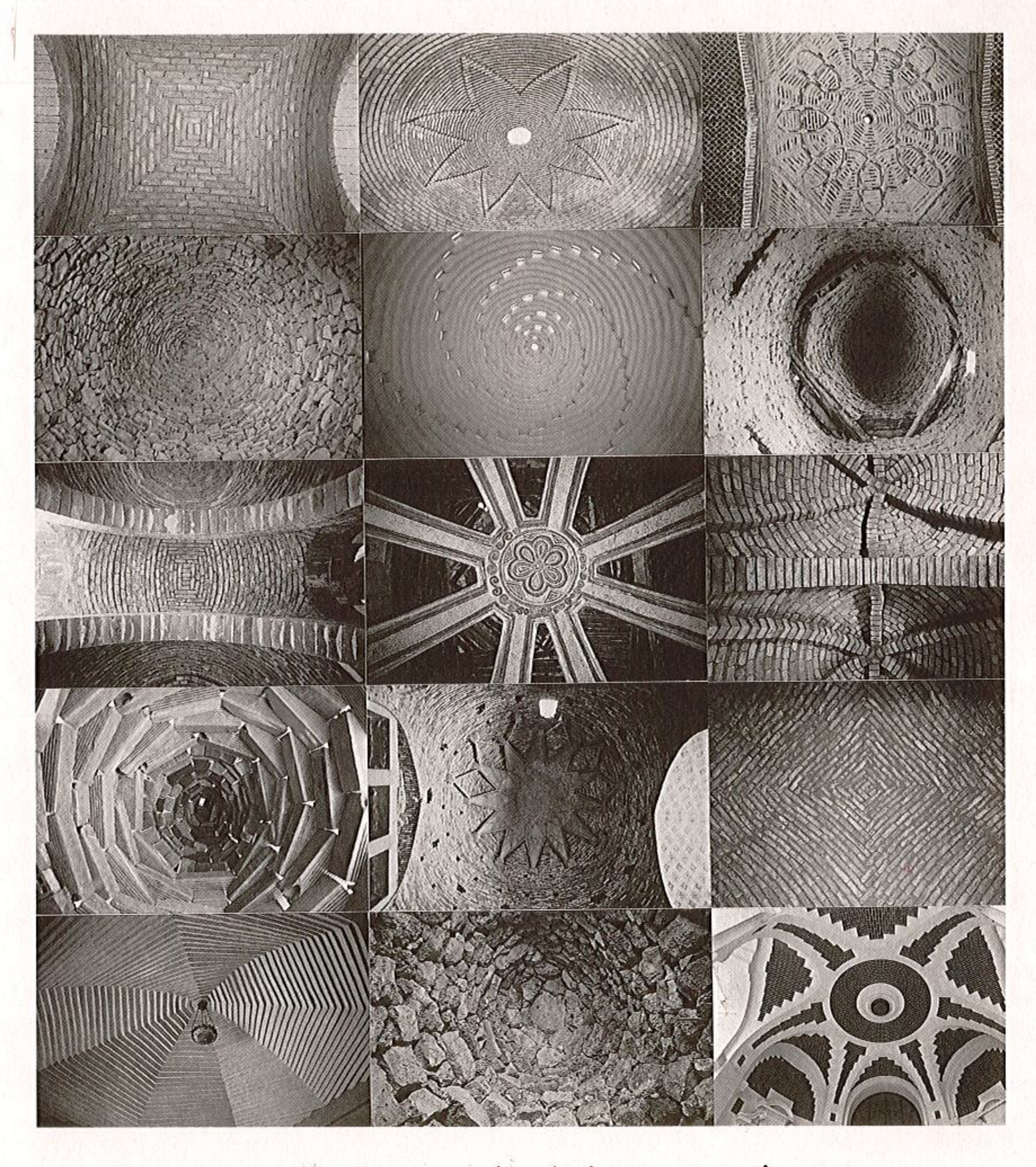


CRATerre

Service de conseil assuré par

CRATerre–EAG
Centre Simone Signoret
BP 53
F-38090 VILLEFONTAINE
FRANCE
Tél. + 33 - 74 96 60 56
Fax + 33 - 74 96 04 63
Télex 308658 F CRATERE

CRATerre-EAG, Centre International de la Construction en Terre - Ecole d'Architecture de Grenoble, se consacre à la promotion de la terre comme matériau de construction. CRATerre-EAG travaille de manière intégrée dans des actions de recherche, d'application, d'expertise, de formation et de diffusion qui sont menées simultanément. Les trois principaux programmes de développement sont : i) l'industrialisation, ii) l'habitat économique, iii) la préservation des patrimoines.
La compétence du CRATerre-EAG couvre tous les aspects de la construction en terre à tous les niveaux.

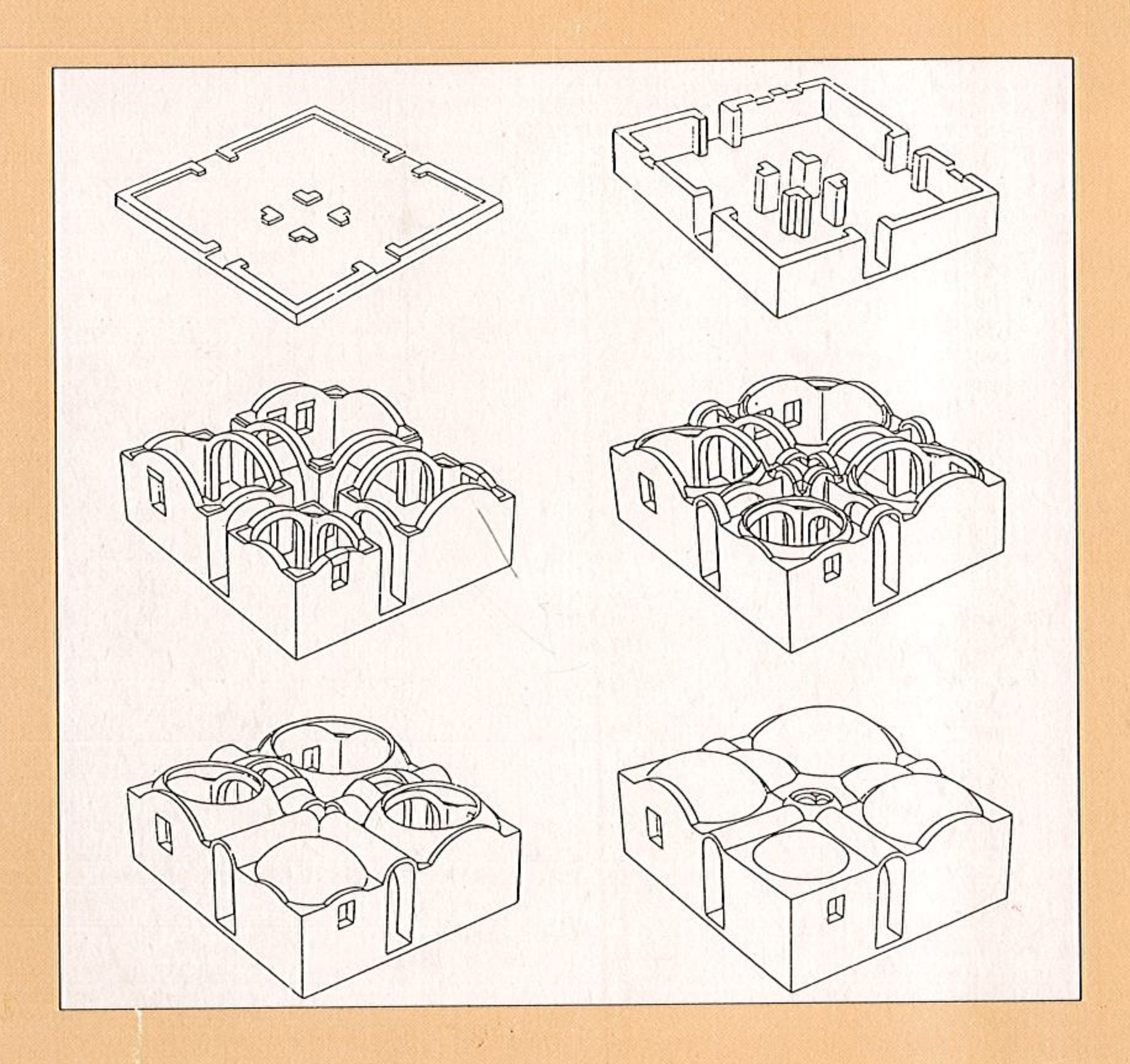


Pour en savoir plus au sujet de la construction en arcs, voûtes et coupoles

Pour partager votre expérience dans ce domaine

N'hésitez pas à nous contacter

BASIN



A QUI S'ADRESSE CE DOCUMENT ?
Décideurs, architectes, ingénieurs, responsables de projets, entrepreneurs du bâtiment et tous ceux qui veulent en savoir plus sur la construction en arcs, voûtes et coupoles.

CE QUE VOUS POUVEZ TROUVER DANS CE DOCUMENT.
Des informations de base sur la construction en arcs, voûtes et coupoles.
Les avantages, les possibilités et les limites des arcs, voûtes et coupoles.
Des conseils, des références bibliographiques et des adresses pour obtenir plus d'information.

CE QUE VOUS NE TROUVEREZ PAS DANS CE DOCUMENT.
Des informations techniques détaillées.
Des informations relatives à des conditions locales.